



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA
LABORATÓRIO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÕES ESPACIAIS

**METODOLOGIA DE DELIMITAÇÃO DAS UNIDADES HIDROGRÁFICAS NO
ÂMBITO DO DISTRITO FEDERAL**

FELIPE LIMA RAMOS BARBOSA

ORIENTADOR: PROF. DR. RENATO FONTES GUIMARÃES

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

BRASÍLIA
SETEMBRO/2012

FELIPE LIMA RAMOS BARBOSA

**METODOLOGIA DE DELIMITAÇÃO DAS UNIDADES HIDROGRÁFICAS NO
ÂMBITO DO DISTRITO FEDERAL**

Dissertação de Mestrado submetida ao Departamento de Geografia da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos necessários a obtenção do Grau de Mestre em Geografia, área de concentração “Gestão Ambiental e Territorial” e linha de pesquisa “Geoprocessamento para a Gestão Territorial e Ambiental”, opção Acadêmica.

ORIENTADOR: PROF. DR. RENATO FONTES GUIMARÃES

BRASÍLIA
SETEMBRO/2012

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA
LABORATÓRIO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÕES ESPACIAIS

**METODOLOGIA DE DELIMITAÇÃO DAS UNIDADES HIDROGRÁFICAS NO
ÂMBITO DO DISTRITO FEDERAL**

FELIPE LIMA RAMOS BARBOSA

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:

Prof. Dr. Renato Fontes Guimarães – Universidade de Brasília - UnB

Prof. Dr. Paulo Márcio Leal de Menezes – Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

Prof. Dr. Manoel Couto Fernandes – Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

Brasília, 04 de setembro de 2012.

FICHA CATALOGRÁFICA

BARBOSA, FELIPE LIMA RAMOS

Metodologia de delimitação das Unidades Hidrográficas no âmbito do Distrito Federal, 137p., 297mm, (UnB-IH-GEA-LSIE, Mestrado, Gestão Ambiental e Territorial, 2012).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Departamento de Geografia.

- | | |
|-------------------------------------|-------------------------------|
| 1. Gestão dos Recursos Hídricos | 2. Bacias Hidrográficas |
| 3. Modelo Digital de Elevação – MDE | 4. Consistência Hidrológica |
| 5. Unidades Hidrográficas | 6. Planejamento e Ordenamento |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BARBOSA, Felipe Lima Ramos. **Metodologia de delimitação das Unidades Hidrográficas no âmbito do Distrito Federal**. (Dissertação de Mestrado), Curso de Pós-graduação em Geografia, Universidade de Brasília, 2012, 137p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Felipe Lima Ramos Barbosa.

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: “Metodologia de delimitação das Unidades Hidrográficas no âmbito do Distrito Federal”.

GRAU/ANO: Mestre/2012

É concedida a Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação e emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Felipe Lima Ramos Barbosa

*“Se houvesse apenas uma única verdade,
não poderiam pintar-se cem telas
sobre o mesmo tema”*

Pablo Neruda

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram para a concretização desse projeto de pesquisa, que aguentaram minhas agonias e ansiedades ao longo desses 2 anos e meio de mestrado;

À minha família, que sempre me apoiou nas minhas aventuras, sejam acadêmicas ou não;

À Thallyta de Carvalho Tomimatsu, pela motivação, apoio e compreensão nos momentos difíceis de agonia, impaciência e ansiedade durante essa empreitada;

Ao meu orientador, Prof. Dr. Renato Fontes Guimarães, pela paciência, confiança, amizade, aprendizado e incentivos;

Aos professores Dr. Osmar Abílio de Carvalho Júnior e Dr. Roberto Arnaldo Trancoso Gomes, pelas contribuições, amizade e aprendizado;

Ao Professor Dr Edilson de Souza Bias, pela disponibilização da base de dados que deu fruto a essa pesquisa;

Aos amigos e amigas que me acompanharam durante o desenvolvimento dessa pesquisa: Aline Menke, Gabriel Daldegan, Jacobson Luiz Ribeiro Rodrigues, Bruno Siqueira Abe Saber Miguel, Fábio Abreu, Priscila Costa, Taiguara, entre outros, agradeço pelas discussões e esclarecimentos que em muito enriqueceram esse trabalho;

À Marina Ravassi (*in memoriam*), por seu entusiasmo com a vida e o trabalho, virtudes que me impulsionaram a continuar buscando meus objetivos.

Ao tio Leandro Paiva (*in memoriam*), pelas risadas e momentos de descontração que também são peça chave no tocante da vida acadêmica;

À Maria, pelo *insight* a 2 anos e meio sobre a temática que hoje culminou nesse trabalho;

Ao amigo Marcelo Sternadt, que mesmo fisicamente distante mantém uma amizade tão próxima;

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE TABELAS.....	xvi
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xvii
RESUMO.....	xix
ABSTRACT.....	xxi
 CAPÍTULO I.....	 01
PROBLEMA DE PESQUISA/ OBJETIVOS.....	01
1.1. Introdução.....	01
1.2. Objetivo Geral.....	06
1.3. Objetivos Específicos.....	06
 CAPÍTULO II.....	 08
DISCUSSÃO TEÓRICO – CONCEITUAL.....	08
2.1. Evolução Histórico – Legislativa.....	08
2.1.1. Código das Águas.....	08
2.1.2. Política Nacional do Meio Ambiente – PNMA e o enquadramento dos corpos d'água.....	10
2.1.3. Domínio das Águas na Constituição Federal de 1988 e a Política Nacional de Recursos Hídricos.....	11
2.2. Modelo Digital de Elevação – MDE.....	14
2.3. Geoestatística, Interpolação e métodos de geração de Modelo Digital de Elevação (MDE).....	18
2.3.1. Preceitos de geoestatística e interpolação.....	18
2.3.2. Interpoladores.....	20
2.3.2.1. <i>Inverso da distância ponderada (IDW) e Vizinho mais próximo.....</i>	<i>20</i>
2.3.2.2. <i>Método Krigagem.....</i>	<i>22</i>
2.3.2.3. <i>Método TOPOGRID.....</i>	<i>24</i>
2.4. Modelagem hidrológica.....	26
2.4.1. Modelo de direção de fluxo D8.....	27
2.4.2. Modelo de direção de fluxo D_{∞}	29

2.5. Sensoriamento Remoto e os Modelos Digitais de Elevação (MDE)	31
2.5.1. Sensoriamento Remoto	31
2.5.2. Fotogrametria e os MDE's	36
2.5.3. Imageamento Interferométrico por Radar e os MDE's	41
2.5.4. <i>Krigagem</i> utilizando dados do SRTM: o exemplo do TOPODATA	45
CAPÍTULO III	47
CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	47
3.1. Localização da área de estudo	47
3.2. Clima	48
3.3. Vegetação	50
3.4. Solos	53
3.5. Geomorfologia	56
CAPÍTULO IV	60
MATERIAIS E MÉTODOS	60
4.1. Pré-processamento dos materiais de entrada utilizados	61
4.1.1. Pré-processamento dos dados vetoriais utilizados	61
4.2. Etapa de interpolação e geração do Modelo Digital de Elevação (MDE)	67
4.3. Consistência hidrológica do MDE gerado	75
4.4. Validação altimétrica do MDEHC elaborado	79
4.5. Determinação das áreas de contribuição e delimitação das UH's – área-teste bacia hidrográfica do Lago Paranoá	80
4.6. Delimitação das Unidades Hidrográficas (UH's) com base no MDEHC elaborado	86
CAPÍTULO V	92
RESULTADOS E DISCUSSÃO	92
5.1. Modelo Digital de Elevação (MDE)	92
5.2. Consistência hidrológica e o MDEHC	95
5.3. Resultados das estimativas das áreas de contribuição na bacia hidrográfica do Lago Paranoá – método D8 e D^∞	100
5.4. Resultado da avaliação altimétrica do MDEHC elaborado para o Distrito Federal	105

5.5. Delimitação das 36 Unidades Hidrográficas e a comparação com o mapeamento <i>Unidades Hidrográficas do Distrito Federal (SEMATEC/ CODEPLAN)</i>	108
CAPÍTULO VI	127
CONCLUSÕES	127
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	130
ANEXOS	137

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Representação espacial das principais bacias hidrográficas no âmbito do Distrito Federal.....	05
Figura 2.1 – Representação em malha regular (células quadradas) de parte de uma superfície hipotética.....	16
Figura 2.2 – Representação visual esquemática do método Vizinheiro Mais Próximo.....	20
Figura 2.3 – Variação da distância de cada amostra em relação ao pixel estimado.....	21
Figura 2.4 – Semivariograma hipotético com os respectivos coeficientes numéricos.....	23
Figura 2.5 – Representação hipotética do relevo contendo curvas de nível, depressões espúrias (círculos pretos) e canais de drenagem (linhas tracejadas).....	25
Figura 2.6 – Representação da estruturação, concentrado e distribuído, dos modelos hidrológicos.....	26
Figura 2.7 – Ilustração das oito possibilidades de escoamento superficial para cada célula do modelo, método D8.....	28
Figura 2.8 – Cálculo de declividade na escolha do caminho preferencial do fluxo de água em um MDE hipotético. A direção é determinada em relação à célula que apresenta a maior declividade à célula de referência.....	28
Figura 2.9 – Modelo hipotético de acumulação do fluxo direcional do método D8.....	29
Figura 2.10 – Método D^∞ de fluxo o qual adota o caminho preferencial de acordo com a declividade.....	30
Figura 2.11 – Comparação de métodos de direção de fluxo. (a) Única direção, D8. (b) Duas direções D^∞	31
Figura 2.12 – Espectro eletromagnético.....	32
Figura 2.13 – Interação sofrida pela radiação eletromagnética, no comprimento de onda do infravermelho, durante o trajeto Sol – sensor.....	35
Figura 2.14 – Representação esquemática do <i>ângulo paralático</i> (\emptyset) e sua relação com a distância/ profundidade de uma paisagem.....	37
Figura 2.15 – Representação da estrutura de blocos de fotografias utilizadas em levantamentos aerofotogramétricos.....	38

Figura 2.16 – Exemplo de aerolevantamento utilizando duas linhas de vôo (linha 3 e 4) com três fotografias verticais cada.....	39
Figura 2.17 – Ilustra a necessidade de edição e pós-processamento no MDE extraído utilizando técnicas estereoscópicas. (a) MDE não-corrigido derivado de técnicas de fotogrametria digital; (b) MDE corrigido; (c) MDE com árvores e edifícios removidos; (d) Mapa de declividade produzido a partir do MDE com edifícios e árvores removidos.....	41
Figura 2.18 – Esquema do procedimento de imageamento SAR. Sintetização baseada no efeito <i>Doppler</i> em diferentes momentos de passagem.....	42
Figura 2.19 – Diferentes possibilidades de estruturação de imageamento interferométrico por radar SAR. (a) Em passagens diferentes (b) Na mesma passagem.....	43
Figura 2.20 – Comparação entre os dados (a) SRTM (90 metros) e (b) TOPODATA (30 metros), para uma mesma área de referência.....	46
Figura 3.1 - Contexto espacial do Distrito Federal, suas áreas protegidas e as Regiões Hidrográficas.....	47
Figura 3.2 – (a) Distribuição das normais climatológicas da precipitação (mm), entre o período de 1961 a 1990, no Distrito Federal. (b) Tabela com valores trimestrais relativos a precipitação acumulada registrados na estação Brasília/INMET.....	49
Figura 3.3 – Representação típica de Campo Limpo com presença de gramíneas e pouca presença de arbustos maiores que um metro.....	50
Figura 3.4 – Composição florística típica de cerrado <i>Sensu Strictu</i>	51
Figura 3.5 – Exemplo de mata galeria localizada em vale encaixado, associada a maior disponibilidade hídrica do curso d água.....	52
Figura 3.6 – Representação típica de mata mesofítica, com indivíduos de porte médio e caule reto, que se desenvolvem em solos férteis.....	52
Figura 3.7 – Mapa de solos do Distrito Federal, na escala 1:100.000, com as indicações das classes acima apresentada (projeção: UTM 23S estendido a oeste – SICAD.....	55
Figura 3.8 – A) Região de dissecação de vales; B) Exemplo de borda de chapada e região de vales dissecados, apresentando escarpa na zona de transição; C) Configuração típica de região de dissecação intermediária; D) Rebordo de transição entre área de dissecação intermediária e área de chapada.....	57
Figura 3.9 – (a) Mapa geomorfológico utilizado na etapa de diagnostico do Zoneamento Ecológico-Econômico da RIDE. (b) Legenda do respectivo mapa.....	58/59
Figura 4.1 – Roteiro metodológico simplificado.....	60

- Figura 4.2** – Representação de um conjunto de ortofotos proveniente do aerolevantamento mencionado e os dados de entrada vetorial, na escala 1:10.000, curvas de nível, pontos cotados e hidrografia.....63
- Figura 4.3** – Disposição espacial dos pontos cotados (cor marrom) utilizados na etapa de interpolação, bem como os pontos cotados escolhidos (cor vermelha) para a etapa de validação altimétrica proposta para o MDE.....64
- Figura 4.4** – Exemplo hipotético da etapa de correção da malha hidrográfica (cor azul) segundo sua conectividade e direcionamento, primordial para a etapa posterior de interpolação. As setas vermelhas mostram o direcionamento do escoamento vetorial de cada trecho de curso d’água.....65
- Figura 4.5** – Mostra o *buffer* (8Km) utilizado para a seleção das informações altimétricas provenientes do refinamento TOPODATA, bem como a zona de sobreposição (1 km) entre os dados de entrada nesta etapa metodológica.....66
- Figura 4.6** – Efeito de “ruptura” do relevo devido à passagem “abrupta” de um dado altimétrico para outro com diferença metodológica no levantamento. O círculo em vermelho exemplifica o efeito o qual se deseja evitar.....66
- Figura 4.7** – Mostra os centróides das células do produto TOPODATA com informações altimétricas relevantes (pontos na cor preta), bem como a estimada área de interseção entre os dados provenientes do TOPODATA e do aerolevantamento fotogramétrico.....67
- Figura 4.8** – Exemplo do “efeito escada” após o processo de interpolação utilizando o algoritmo TOPOGRID.....69
- Figura 4.9** – Área-teste selecionada na porção norte do DF, bem como a base (feição linear representado na cor vermelha) para a estimativa dos perfis topográficos dos oito diferentes MDE’s elaborados.....70
- Figura 4.10** – Perfis topográficos dos oito MDE’s elaborados, conforme diferentes parametrizações, acompanhados de porção com “efeito escada”. **(a)** Topo1; **(b)** Topo2; **(c)** Topo3; **(d)** Topo4; **(e)** Topo5; **(f)** Topo6; **(g)** Topo7; **(h)** Topo8.....71/72
- Figura 4.11** – Em um MDE hipotético, aplicação do algoritmo *Agree* na primeira etapa da consistência hidrológica. Percebe-se que apenas a célula coincidente ao canal de drenagem sofreu alteração altimétrica.....76
- Figura 4.12** – Processo matemático de consistência dos talvegues.....77
- Figura 4.13** – Estruturação do talvegue em um MDE hipotético. Nesse caso é visível a alteração dos valores altimétricos da célula coincidente com o canal de drenagem e de seus vizinhos, estruturando o respectivo talvegue.....77
- Figura 4.14** – Representação espacial da hidrografia vetorial utilizada (em cor azul) na etapa de interpolação junto com os vetores de ajuste (em cor vermelha) com o intuito de garantir a estruturação dos talvegues no MDEHC.....78

- Figura 4.15** – Contexto espacial da bacia hidrográfica do Lago Paranoá selecionada como área-teste (cor bege), bem como o *buffer* de 6 km utilizado para a seleção dos dados vetoriais de entrada para o processo de interpolação, com o intuito de eliminar o efeito de borda.....81
- Figura 4.16** – Unidades Hidrográficas pertencentes à bacia hidrográfica do Lago Paranoá (Fonte: Mapa de Unidades Hidrográficas do DF – 1994 – SEMATEC/CODEPLAN – Escala 1:100.000).....82
- Figura 4.17** – MDE's de base de teste para a estimativa das áreas de contribuição utilizando os dois métodos envolvidos. **(a)** MDE consistido com 20 metros de resolução espacial. **(b)** MDE consistido com 7 metros de resolução espacial. Podem-se perceber os talwegues constituídos em cada modelo. **(c)** MDE - 20 metros *hillshade*. **(d)** MDE – 7 metros *hillshade*.....83
- Figura 4.18** – Apresenta os cinco exutórios (em cor amarela) localizados com base na área de contribuição calculado pelo método D_{∞} , representado pela função Log_{10}84
- Figura 4.19** – Exemplo do roteiro metodológico proposto para a extração e estimativa individualizada da UH Santa Maria a partir do ponto de exutório previamente determinado, bem como a conversão da mesma para o formato vetorial. **(a)** Exemplo em aplicação no MDE 20 metros. **(b)** Exemplo em aplicação no MDE 7 metros.....85
- Figura 4.20** – Fluxograma metodológico das etapas de delimitação das 36 Unidades Hidrográficas, com base no MDEHC previamente estimado.....86
- Figura 4.21** – **(a)** Exemplo do modelo de direção de fluxo elaborado utilizando o método D8 da porção noroeste do Distrito Federal. **(b)** Exemplo do modelo de acumulação de fluxo derivado do modelo direcional da mesma porção noroeste.....87
- Figura 4.22** – Mostra exemplo da drenagem numérica extraída utilizando o limiar de 1000 células na porção noroeste do DF.....88
- Figura 4.23** – Mostra, em duas situações geográficas distintas, as áreas de drenagem extraídas de cada trecho de curso d'água da drenagem numérica elaborada. **(a)** Situação em relevo mais plano; **(b)** Situação em relevo dissecado.....89
- Figura 4.24** – **(a)** Mostra, numa porção central do DF, as informações vetoriais utilizadas para compartimentar as áreas de drenagem em Unidades Hidrográficas segundo o mapeamento de referência; **(b)** Exemplo da compartimentação vetorial realizadas sobre as áreas de drenagem.....90
- Figura 5.1** – **(a)** MDE gerado, com 20 metros de resolução espacial, adotando a parametrização previamente discutida na utilização do algoritmo TOPOGRID. **(b)** Representação em *hillshade*.....93
- Figura 5.2** – Depressões “espúrias” remanescentes do processo de interpolação dos dados altimétricos de entrada.....94

Figura 5.3 – Resultado do “rebaixamento” realizado na célula correspondente a drenagem vetorial de entrada por meio da aplicação do algoritmo *Agree*.....95

Figura 5.4 – (a) Amostra de parte das depressões remanescentes da etapa de interpolação, bem como aos locais que sofreram preenchimento (Representação em Log10 em coloração alaranjada). (b) Representação em *log10* de local cuja depressão foi preenchida e consistia apenas da célula incidente.....96

Figura 5.5 – MDE com as calhas recuperadas, por meio de álgebra de mapa, relativo aos valores altimétricos estimados na etapa de interpolação. Representação, em log10, dos locais cujas depressões foram ajustadas conforme o método proposto (coloração alaranjada).....97

Figura 5.6 – (a) MDEHC com os talwegues estruturados. (b) Perfil topográfico (A – B) de uma porção com talwegues.....98/99

Figura 5.7 – Coincidência entre a drenagem vetorial (em cor azul) e a estimada no MDEHC gerado (em vermelho). (a) Estimativa da drenagem numérica sem a construção dos talwegues. (b) Estimativa da drenagem numérica com a construção dos talwegues.....99

Figura 5.8 – Resultado obtido da estimativa das cinco UH’s de interesse por meio do método D8 - (a) MDE 20 metros (b) MDE 7 metros, e do método D^∞ - (c) MDE 20 metros (d) MDE 7 metros.....101

Figura 5.9 – (a) Comparação entre as UH’s Santa Maria, Bananal, Riacho Fundo e Ribeirão do Gama, delimitadas a partir do método D8, conforme o refinamento da resolução espacial do MDEHC. (b) Comparação entre as UH’s Santa Maria, Bananal, Riacho Fundo e Ribeirão do Gama, delimitadas a partir do método D^∞ , conforme o refinamento da resolução espacial do MDEHC.....103/104

Figura 5.10 – (a) Limites entre as UH’s Santa Maria, Bananal e Riacho Fundo, considerando a estimativa utilizando o método D8 (esquerda) e D^∞ (direita). (b) Limites entre as UH’s Riacho Fundo e Ribeirão do Gama, considerando a estimativa utilizando o método D8 (esquerda) e D^∞ (direita).....105

Figura 5.11 – Gráfico de dispersão dos valores de diferença encontrados entre os pontos amostrados. O Gráfico está sequenciado das maiores as menores diferenças altimétrica, valores representados no eixo y. Em cor vermelha os valores encontrados com as maiores diferenças.....107

Figura 5.12 – Mostra os pontos de controle que apresentaram valores mais elevados com relação à diferença altimétrica dentre a nuvem amostral selecionada.....108

Figura 5.13 – Mostra o modelo de direção de fluxo derivado do MDEHC elaborado para o contexto espacial do Distrito Federal.....109

Figura 5.14 – Apresenta o modelo de acumulação de fluxo (*log10*) referente a área de abrangência do DF, bem como a relação entre os valores derivados e as altimetria.....110

Figura 5.15 – (a) Mostra as áreas de drenagem de cada trecho de curso d'água derivado do MDEHC; **(b)** Ajustes e compartimentações vetoriais em bacias hidrográficas, conforme as Unidades Hidrográficas.....111

Figura 5.16 – Resultado das 36 UH's delimitadas com base no MDEHC elaborado.....112

Figura 5.17 – (a) Mostra a discrepância nos traçados dos divisores d'água entre as UH's do Lago Paranoá, Riacho Fundo e Bananal. Base: Ortofoto do levantamento da TERRACAP. **(b)** Mostra a respectiva área sobreposta aos vetores de curva de nível e pontos cotados.....114

Figura 5.18 – (a) Outro ponto com discrepância identificado entre os limites das UH's Vereda Grande, Mestre D'Armas e Pipiripau. **(b)** Comparação desta área com os vetores de curvas de nível utilizados na modelagem.....115/116

Figura 5.19 – (a) Outro ponto de discrepância observado entre as UH's do Lago Paranoá, Papuda, Cachoeirinha e Santana. **(b)** Comparação desta área identificada com os vetores de curva de nível 1:10.000.....116/117

Figura 5.20 – Mostra a comparação entre os traçados das UH's do mapa de referência de 1994, do ZEE/DF e as derivadas por modelagem, no limite de Vereda Grande, Mestre D'Armas e Pipiripau. **(a)** Ponto com discrepância identificada entre os limites das UH's Vereda Grande, Mestre D'Armas e Pipiripau. **(b)** Comparação desta área com os vetores de curvas de nível utilizados na modelagem.....118

Figura 5.21 – Mostra a comparação entre os traçados das UH's do mapa de referência de 1994, do ZEE/DF e as derivadas por modelagem, no limite do Lago Paranoá, Papuda, Cachoeirinha e Santana. **(a)** Ponto com discrepância identificada entre os limites das UH's do Lago Paranoá, Papuda, Cachoeirinha e Santana. **(b)** Comparação desta área com os vetores de curvas de nível utilizados na modelagem.....119

Figura 5.22 – Mostra a comparação entre os traçados das UH's Lago Paranoá, Riacho Fundo e Bananal, com base nas três fontes consideradas. **(a)** Com base nas ortofotos levantadas pela Terracap. **(b)** Comparação das citadas UH's, seus limites e as curvas de nível utilizadas na modelagem.....120/121

Figura 5.23 – Sobreposição entre UH's e Regiões Administrativas no contexto do Distrito Federal.....122

Figura 5.24 – Relação de Regiões Administrativas abrangidas pela Unidade Hidrográfica do Melchior – Belchior.....123

Figura 5.25 – Sobreposição entre as RA's de Brasília, Sobradinho II (Colorado) e Brazlândia e as UH's Santa Maria – Torto, Sonhim, Pedreira e Palma, estimadas do MDEHC elaborado.....124

Figura 5.26 – Mostra a incompatibilidade entre o limite noroeste considerado para as RA's VI – Planaltina e V – Sobradinho comparados aos derivados pela metodologia proposta. A área hachurada apresenta o local que deveria ter ajuste no traçado das RA's.....125

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1 – Valores adotados na parametrização da interpolação TOPOGRID para cada um dos oito MDE's.....	70
Tabela 4.2 – Mostra os valores utilizados na parametrização do algoritmo TOPOGRID, bem como os valores padrão adotado pelo algoritmo.....	74
Tabela 4.3 - Parâmetros instituídos para validação altimétrica e planimétrica de produtos cartográficos segundo as classes presente nos artigos do Decreto nº 89.817/84.....	80
Tabela 4.4 - Valores altimétricos a serem adotados para esta avaliação segundo a equidistância da escala de análise – 1:100.000.....	80
Tabela 5.1 – (a) Limiares de validação altimétrica presente nas Normas Técnicas da Cartografia Brasileira – Decreto n 89.817/84 – correspondente a escala 1:100.000 (equidistância de 50 metros). (b) Valores encontrados a partir da aplicação da metodologia de validação proposta.....	106
Tabela 5.2 – Diferença entre os valores de área comparando-se as UH's do mapeamento de referência e os estimados utilizando o MDEHC.....	113

LISTA DE ABREVIATURAS

ANA – Agência Nacional de Águas

CODEPLAN – Companhia de Planejamento do Distrito Federal

CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente

CONCAR – Comissão

DEM – *Digital Elevation Model*

DSM – *Digital Surface Model*

DTM – *Digital Terrain Model*

EMQ – Erro Médio Quadrático

EP – Erro Padrão

GPS – *Global Positioning System*

IDW – Inverso da Distância Ponderada

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

InSAR – Interferometria de Radar SAR

LIDAR - *Light Detection And Ranging*

MDE – Modelo Digital de Elevação

MDEHC – Modelo Digital de Elevação hidrologicamente consistente

MDS – Modelo Digital de Superfície

MDT – Modelo Digital de Terreno

MNE – Modelo Numérico de Elevação

MNT – Modelo Numérico de Terreno

PARNA – Parque Nacional

PDOT – Plano Diretor de Ordenamento Territorial

PEC – Padrão de Exatidão Cartográfica

PNMA – Política Nacional de Meio Ambiente

PNRH – Política Nacional de Recursos Hídricos

RA – Região Administrativa

SAR - *Synthetic aperture radar*

SEMATEC – Secretaria de Meio Ambiente, Ciência e Tecnologia

SICAD – Sistema Cartográfico do Distrito Federal

SIG – Sistema de Informação Geográfica

SINGREH – Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos

SISNAMA – Sistema Nacional de Meio Ambiente

SNIRH – Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos

SRTM - *Shuttle Radar Thematic Mapper*

TAC – Termo de ajustamento de conduta

TERRACAP – Agência de Desenvolvimento do Distrito Federal

TIN - *Triangulated Irregular Network*

UH – Unidade Hidrográfica

ZEE – Zoneamento Ecológico-Econômico

RESUMO

O Brasil possui uma vasta e rica rede de drenagem cujos recursos hídricos são utilizados para os mais diversos fins, tais como uso urbano, industrial, agropecuário, dentre outros, constituindo-se num bem de domínio público, dotado de valor econômico e natureza limitada (Lei nº 9.433/97, art. 1º, I e II). Sendo assim é de suma importância priorizar sua eficiente gestão a fim de garantir a devida disponibilidade quali-quantitativa às gerações futuras. Com isso, a própria Lei das Águas (Lei nº 9.433/97, art. 1º, V) preconiza a bacia hidrográfica como unidade territorial de implementação das ações do mencionado diploma. Limitando-se ao contexto espacial do Distrito Federal, o objetivo desse trabalho foi propor um método de delimitação das Unidades Hidrográficas (UH's), com base em técnicas de geoprocessamento e comparar com o atual e vigente mapeamento das UH's do Distrito Federal, cujo enfoque era mostrar as limitações e potencialidades do método ora proposto. Essas citadas UH's são provenientes do *Mapa das Unidades Hidrográficas do DF*, elaborado pela extinta Secretaria de Meio Ambiente, Tecnologia e Ciência – SEMATEC em parceria com a Companhia de Planejamento do Distrito Federal – CODEPLAN, em 1994. A metodologia de trabalho pode ser dividida em 4 (quatro) momentos: (a) Edição e ajustes dos dados vetoriais altimétricos; (b) Elaboração do Modelo Digital de Elevação (MDE), utilizando o algoritmo Topogrid (HUTCHINSON, 1989) e subsequente etapa de consistência hidrológica (MDEHC); (c) Validação da acurácia posicional altimétrica relativa do MDEHC; (d) extração automatizada das áreas de drenagem e compartimentação vetorial das 36 Unidades Hidrográficas, segundo o material cartográfico de referência. A utilização de MDE como parte integrante do fluxo metodológico visa possibilitar a derivação dos modelos de estimativa do fluxo direcional superficial da água no terreno, e com isso dar maior acurácia no traçados dos divisores d'água. Assim nesse trabalho foi conduzida uma discussão a respeito do método direcional de fluxo D_8 e D_∞ , em relação ao objeto pesquisado, sendo que o primeiro mostrou melhores resultados para a finalidade de delimitação das UH's de interesse. A comparação entre as UH's delimitadas segundo o modelo altimétrico e as relativas ao mapa de referência adotado mostraram, inicialmente, coerência em relação aos valores médios absoluto ($5,03 \text{ Km}^2$) e relativo (3,71%) referente ao cálculo de área,

porém apresentaram discrepâncias pontuais com relação a forma das mesmas. A importância dessa dissertação remete à otimização das políticas públicas de gestão dos recursos hídricos, principalmente no escopo do planejamento e ordenamento territorial. Assim, também foi realizado uma comparação entre as UH's elaboradas e o traçado das atuais Regiões Administrativas (RA's). Observou-se que ocorriam discrepância entre as mesmas, situação desfavorável a gestão dos recursos hídricos.

Palavras-Chaves: Gestão dos Recursos Hídricos; Bacias Hidrográficas; Modelo Digital de Elevação – MDE; Consistência Hidrológica de MDE; Unidades Hidrográficas – UH's; Planejamento e Ordenamento Territorial; Distrito Federal.

ABSTRACT

Brazil has a vast and rich natural drainage network and this water resource has been utilized for numerous and varied uses, for example: urban use, industrial, farming/livestock, and other. This Brazilian natural resource has a public domain, with monetary value and is therefore covered under the Legal aspects on Brazilian land use and water law (Law nº 9.433/97, art 1º, I e II). It is therefore extremely important to prioritize its efficient management to enable the outstanding qualitative-quantitative availability of this precious natural resource for the future generations. The Water's Law, denotes the watershed boundaries' and uses these boundaries as a territorial land unit to enable the implementation of the prescribed actions for water usage in the above mentioned law. With regard to Distrito Federal's limits, the aim of this study is to propose a method that's defines the Hydrographic Units (HU's) using geoprocessing techniques and furthermore compare these HU's to those actually used on Distrito Federal's Hydrographic Units map. Those HU's had came from "*Mapa das Unidades Hidrográficas do DF*", created by Scientific, Technologic and Environmental secretary (SEMATEC) and its partner Distrito Federal Planning Company (CODEPLAN), prior to 1994. The methodology of this study can be subdivided into stages: (a) Editions and adjustments to existing altimetry vectorial data; (b) Digital Elevation Model (DEM)'s generation using Topogrid's algorithm (HUTCHINSON, 1989) following by hydrological consistency and elaboration of hydrologically corrected DEM (MDEHC); (c) Validation of the relative altimetry position accuracy considering the corrected DEM generated; (d) Automatized Drainage areas' extraction and delineation of the 36 HU's according to reference cartography material used in this study. The main use of DEM in this paper study is to gain the best possible altimetry derivations including a flow direction and flow accumulation grid that describes the water's superficial behavior onto the landscape. Therefore this study has brought forwards a discussion regarding the use of D8 and D_{∞} to estimate flow direction grid. The first study had shown better results when compared with the second one, considering the HU's delimitation of interest. The comparison between HU's from both products (MDEHC and SEMATEC/CODEPLAN's reference map) has shown coherence if you consider absolute standard value (5,03 Km²) and relative one (3,71%) related to area calculation, nevertheless those ones have shown differences between their polygonal

forms. The relevance of this research is to determine and optimize the public policies about water resource management in Brazil, mainly due to sustainable planning and ordering in territorial's anthropic occupation. So, those UH's were compared with the Administrative Regions (RA's) of Distrito Federal and it was realized that there were difference between the form of both, situation not favorable to water resource management.

Keywords: Water Resources' management; Watersheds; Digital Elevation Model – DEM; Hydrological consistency applied to DEM; Hydrographic Units – HU's; Planning and territorial ordering; Distrito Federal; Drainage network.

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE PESQUISA/ OBJETIVOS

1.1. INTRODUÇÃO

O Brasil, com todas suas riquezas minerais e ambientais possui uma ampla rede hidrográfica, que atende aos mais variados usos consuntivos¹. No ano de 2000 foram retirados 1.592 m³/s de água dos mananciais para atender a essas demandas específicas, sendo que 53% foram efetivamente consumidos e o restante retornou às diversas bacias hidrográficas (BRASIL, 2005). Diante de tal demanda torna-se inquestionável a preservação e a gestão, com bases sustentáveis, dos recursos hídricos e das suas respectivas bacias hidrográfica associadas, ações estas que, de fato, se tornaram uma das principais preocupações governamentais e sociais da atualidade.

É cada vez maior a quantidade de órgãos públicos e associações que buscam desenvolver a gestão dos recursos hídricos com base em bacias de drenagem², na tentativa de sistematizar o escopo, por um lado, de disponibilidade e, por outro, de demanda pelo uso da água, possibilitando o crescimento e a produção. Resumidamente, esta específica gestão ambiental deve estar baseada no balanço hídrico e na renovação do sistema natural, o que se encaixa perfeitamente na lógica de gerenciamento por bacias hidrográficas.

Assim, o gerenciamento supra mencionado é um importante instrumento que orienta o poder público, como grande tutor do meio ambiente, e a sociedade na tarefa compartilhada de utilização e monitoramento dos recursos naturais hídricos, econômicos e socioculturais, de forma a promover o desenvolvimento sustentável (LANNA, 1995).

Alguns pressupostos fundamentais devem ser adotados em qualquer processo de gerenciamento de recursos hídricos, a saber: o acesso aos recursos hídricos é um direito de todos; a água deve constituir um bem econômico; a existência de um efetivo sistema de planejamento e controle; critérios sociais, econômicos e ambientais determinam a distribuição; a educação ambiental está presente em toda

¹ Consumo significativo de água

² Também se entenda por bacias hidrográficas.

ação programada; os usuários participam da administração da água; a cooperação internacional é indispensável; o desenvolvimento tecnológico e de recursos humanos são constantes; a avaliação sistemática dos recursos hídricos, coletados e gerados são disseminados ao governo (federal, estadual e municipal) e a sociedade, de forma rápida, consistida e sem ônus, por intermédio de relatórios, livros, etc, e por meio de sistemas de informação (internet, intranet, CD's) e, a mais importante com relação ao enfoque desta pesquisa, **a bacia hidrográfica deve ser adotada como unidade de planejamento** (GALVÃO, 2004).

Tais preocupações podem ser observadas nos artigos que determinam a própria Política Nacional de Recursos Hídricos – PNRH (Lei nº 9.433/97, chamada Lei das Águas). Esta lei, no artigo 1º inciso V, determina que a “bacia hidrográfica” é a unidade territorial para a implementação e operacionalização da PNRH, bem como a atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos - SINGREH. Logo as ações que devem ser tomadas, em âmbito de gestão hídrica, devem considerar como base as bacias hidrográficas, para os Estados e a União, consolidando assim a exigência de um sistema único de codificação.

O estudo das bacias hidrográficas, ente geomorfológico, pode ser realizado a partir de duas abordagens, uma morfométrica e a outra dinâmica (PINTO *et al.*, 1973; LLAMAS, 1993; SILVEIRA, 2001 apud OLIVEIRA, 2008). Com relação ao estudo morfométrico pode-se ilustrar a obtenção de informações referentes à hierarquia fluvial, análise areal, linear e hipsométrica extraídas de fotografias aéreas, cartas topográficas e imagens de satélite, sendo que estas fornecem informações de caráter físico a respeito das bacias hidrográficas. Já a perspectiva dinâmica pode ser entendida como a elaboração de índices estatísticos e modelos matemáticos a partir de amostras coletadas em campo, com certa periodicidade, referentes à precipitação, infiltração, percolação, escoamento superficial, evaporação e evapotranspiração, entre outros. Vale ressaltar que estas duas óticas, morfométrica e dinâmica, muitas vezes caminham juntas na elaboração de modelos ambientais, como pode ser observado, por exemplo, em trabalhos de estimativa de previsão de escorregamentos rasos *shallow stability* (GUIMARÃES *et al.*, 2003).

Contudo, a informação primordial para a delimitação e a estimativa do formato das bacias hidrográficas é o conhecimento prévio a respeito da altimetria do local de estudo. Segundo Barros (2006), a crescente preocupação com os recursos hídricos

ocasiona um aumento pelo interesse em estudos que envolvam a temática das bacias hidrográficas que, *a priori*, necessitam de dados altimétricos.

Convencionalmente, os dados altimétricos de um suposto local de interesse são extraídos a partir de fotografias aéreas e técnicas de fotogrametria, que dão origem às curvas de nível (isolinhas) presentes nas cartas planialtimétricas em suas mais variadas escalas de detalhamento. Essas são técnicas bastante acuradas, porém dispendiosas com relação ao tempo de levantamento e elaboração dos referidos produtos cartográficos. Vale destacar que somente uma pequena parte do território nacional está coberta pelo mapeamento na escala 1:50.000 (aproximadamente 15%) e algo em torno de dois terços dele na escala 1:100.000 (aproximadamente 68%), mas mesmo assim, com problema relacionado à atualização. Além disto, estes produtos cartográficos carregam consigo toda a limitação técnica a época da elaboração, tais como problemas de posicionamento em virtude da indisponibilidade de GPS³ e de processamento de dados, que inviabilizam seus usos a depender do trabalho pretendido (BARROS, 2006).

Desde a última década do século XX, o geoprocessamento começou a ser difundido no trato de informações ambientais e, num enfoque maior, informações que possuam um caráter espacial. Este termo vem sendo confundido com termos mais genéricos, tais como geomática, geoinformações e geotecnologias. Estas últimas genericamente englobam todo o conjunto de tecnologias e métodos que lidam com dados geográficos, tais como o Sistema de Informações Geográficas – SIG, a Cartografia Digital e o Sensoriamento Remoto, que possuem cada um suas características distintas. Porém, o uso dessas técnicas deve ser feito segundo o controle metodológico adotado, considerando suas limitações, que vão desde os limites operacionais até o desconhecimento cartográfico da área de estudo (FERNANDES, 2009).

A utilização deste conjunto de soluções geotecnológicas não pode ser resumida apenas a uma vontade/ modismo do pesquisador/ técnico, mas sim, como uma necessidade de cada vez mais atingir resultados mais detalhados (e confiáveis), considerando toda a complexidade/ particularidade exigidos na

³ Global Positioning System, referente ao sistema de posicionamento global orbital composto por uma constelação de 24 satélites que oferecem informações ao usuário a respeito de sua localização x, y e z, referente a um determinado sistema de referência.

manipulação dos dados que este pesquisador/ técnico deve utilizar. Segundo Christofolletti (1999), os procedimentos operacionais para a modelagem de sistemas ambientais ganharam destaque e nova *performance* no contexto do geoprocessamento.

Nos dias de hoje existem as mais variadas fontes de dados altimétricos em formato digital, desde mapeamentos por radar do *Shuttle Radar Thematic Mapper* (SRTM), a métodos de interpolação e geração dos modelos digitais de elevação (MDE), que são representações digitais da variação contínua da elevação do terreno. Esses conferem objetividade e eficiência no cruzamento e derivação de outras informações, tais como o objeto de interesse deste trabalho, as bacias hidrográficas.

Como exemplo de trabalhos que derivam informações a partir da utilização e manipulação de MDE, pode-se citar: delimitação e extração de *ottobacias* na bacia hidrográfica do rio Verde Grande, afluente do rio São Francisco, que discutiu a respeito da utilização de MDE na gestão dos recursos hídricos (BARBOSA, 2007); o trabalho científico com o objetivo de apresentar uma metodologia de delimitação automatizada de bacias de drenagem e a inserção de novos parâmetros morfométricos para a realização de análise multivariada com a finalidade de caracterizar os compartimentos geomorfológicos na área de estudo do PARNA Serra dos Órgãos, no estado do RJ (OLIVEIRA, 2008); e, o trabalho que utilizou as informações provenientes de MDE em ambiente urbano para identificação de áreas com alta probabilidade de ocorrência de voçorocas⁴, no Gama, cidade-satélite do Distrito Federal (FREITAS, 2005).

Após essa breve discussão, o presente trabalho propõe uma leitura da temática relativa a gestão dos recursos hídricos considerando a área de abrangência do Distrito Federal – DF.

O Distrito Federal é uma área estratégica para o planejamento e gestão dos recursos hídricos, mesmo em nível nacional, uma vez que é composto pelas cabeceiras de três das mais significativas bacias hidrográficas brasileiras, cujas águas banham a região norte, nordeste e centro-sul. Assim, é de suma importância

⁴ Segundo Guerra *et al.* (2003), corresponde a escavação ou rasgão do solo ou de rocha decomposta, ocasionada pela erosão do lençol de escoamento superficial. As voçorocas, quando em grande número e relativamente paralelas, dão aparecimento a verdadeiras áreas de *badland*, ou ainda *áreas voçorocadas*. As voçorocas podem também ser formadas pelo escoamento subsuperficial.

manter o adequado manejo do solo para garantir a devida qualidade/ quantidade necessária dos recursos hídricos a fim de atender seus usos internos, bem como externos, nas referidas bacias hidrográficas. A Figura 1.1 apresenta as principais bacias hidrográficas no âmbito do Distrito Federal.

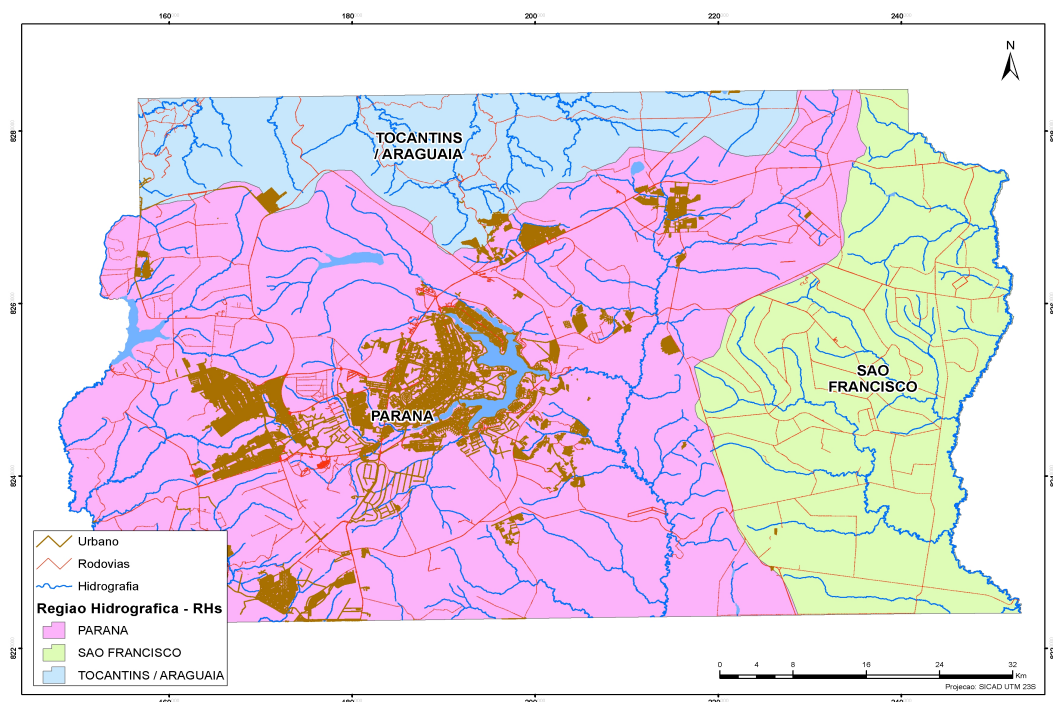


Figura 1.1 – Representação espacial das principais bacias hidrográficas no âmbito do Distrito Federal

A área acima citada é uma interessante área teste para esta pesquisa uma vez que possui um sistema próprio de compartimentação de bacias hidrográficas utilizado na gestão dos recursos hídricos de domínio distrital.

Este sistema consiste basicamente de uma metodologia que apresenta 36 Unidades Hidrográficas - UHs provindas da fragmentação das 3 (três) supracitadas bacias hidrográficas que compõem o cenário hidrográfico do DF.

A respectiva delimitação destas bacias hidrográficas, bem como a fragmentação nas 36 Unidades Hidrográficas – UH's, fazem parte do produto cartográfico intitulado “*Mapa das Unidades Hidrográficas do DF*”, de 1994, elaborado pela extinta Secretaria de Meio Ambiente, Ciência e Tecnologia em parceria com a Companhia de Planejamento do Distrito Federal (SEMATEC/CODEPLAN).

Visto as limitações tecnológicas à época de elaboração deste produto, a hipótese de pesquisa consiste de que existem discrepâncias entre os traçados dos

divisores d'água deste mapeamento se comparado com os divisores d'água gerados a partir das técnicas mais atuais.

1.2. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desta pesquisa é propor um método de delimitação das Unidades Hidrográficas (UH's) com base em técnicas de geoprocessamento e modelagem altimétrica. O enfoque é mostrar as potencialidades e limitações do método proposto.

1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Segue os objetivos específicos que visam atender e direcionar a pesquisa em prol do objetivo geral.

1. Definir a parametrização para o processo de interpolação do Modelo Digital de Elevação (MDE), bem como subsequente consistência hidrológica, cuja finalidade é a representação digital contínua dos valores altimétricos do terreno.
2. Comparar, e discutir, os métodos de fluxo direcional D8 e D_{∞} no tocante a estimativa de área de contribuição, cuja finalidade é identificar as potencialidades e as limitações com relação ao objeto de pesquisa, realizado com base em dois cenários na área-teste da bacia hidrográfica do Lago Paranoá. Esses cenários consideram 2 MDE's, um com resolução espacial mais refinada em relação ao outro.
3. A partir da extração automatizada de bacias hidrográficas, propor uma metodologia de delimitação de UH's com base em modelagem ambiental (MDEHC), e comparar com o atual e vigente mapeamento das UH's do Distrito Federal, bem como com as unidades territoriais adotadas pelo Plano Diretor de Ordenamento Territorial (PDOT), as Regiões Administrativas (RA's).

O **Capítulo II** apresenta a discussão teórico-conceitual envolvendo as diversas temáticas abordadas durante o desenvolvimento da pesquisa. Apresenta a evolução histórico-legislativa dos regulamentos e normas a respeito da gestão dos recursos hídricos, a questão dos MDE e os dados altimétricos, alguns insumos e técnicas de

levantamento e geração de modelos altimétricos, bem como os conceitos e procedimentos utilizados para a consistência hidrológica do modelo.

O **Capítulo III** apresenta, basicamente, a caracterização da área de estudo, com informações relativas a extensão geográfica, amplitude altimétrica, clima, vegetação, geologia, pedologia e geomorfologia.

O **Capítulo IV** é referente as etapas metodológicas adotadas para o desenvolvimento do trabalho visando o objetivo geral proposto. Compreende etapas de ajuste e correções dos insumos de entrada, descreve o algoritmo utilizado para o processo de interpolação e as etapas de consistência hidrológica segundo os fins propostos, apresenta o roteiro metodológico adotado para a validação altimétrica do modelo elaborado, e, finalmente, descreve o fluxograma operacional de delimitação das 36 Unidades Hidrográficas.

O **Capítulo V** apresenta os resultados de cada etapa metodológica previamente apresentada (Capítulo IV), bem como faz uma discussão a respeito das 36 UH's delimitadas do MDEHC e a comparação com o mapa de referencia da SEMATEC/CODEPLAN, com as UH's que estão sendo utilizadas pelo processo recente de ZEE do DF, bem como com as 30 Regiões Administrativas (RA's) do Distrito Federal.

O **Capítulo VI** traz as conclusões alcançadas a partir da análise dos resultados encontrados, limitando-se aos limites da metodologia empregada.

A seção de referencial teórico elenca os diversos documentos que foram utilizados de insumo para a execução dessa pesquisa.

CAPÍTULO II

DISCUSSÃO TEÓRICO-CONCEITUAL

2.1. EVOLUÇÃO HISTÓRICO-LEGISLATIVA

2.1.1. O Código das Águas

O marco regulatório da gestão dos recursos hídricos no Brasil teve início por meio do corpo de texto do Decreto 24.643, de 10 de julho de 1934, que instituiu o Código das Águas. Este diploma legal possibilitou ao Poder Público disciplinar e regular o aproveitamento industrial das águas e, em especial, a exploração do recurso hídrico para as atividades de geração de energia elétrica. Vale salientar a particularidade que o diploma foi editado em forma de Decreto e não de Lei devido ao contexto sócio-político da época relativo ao Governo Provisório decorrente da Revolução de 1930.

Ainda vigente e amplamente modificado por normativas ulteriores, tais como a Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei n 9.433/97), o então conhecido Código das Águas é fruto de uma época na qual o Brasil era um país essencialmente agrícola e começando um crescimento acentuado da indústria, sendo necessário disciplinar os serviços públicos de energia e força resultantes da exploração dos recursos hídricos.

Basicamente o Código das Águas foi elaborado em duas partes. A primeira conteve-se em desenvolver a dominialidade das águas brasileiras, estabelecendo as normas fundamentais do que pode-se chamar de *Direito das Águas*. A segunda, e mais extensa parte, busca disciplinar a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, motivo maior para a própria elaboração do Código (MILARÉ, 2011).

O domínio das águas era fragmentado em três classes, a saber: as águas públicas de uso comum; as águas comuns; e, as águas particulares. As águas públicas de uso comum compreendiam, basicamente, os mares, as águas interiores correntes ou dormentes, navegáveis ou flutuáveis, as águas correntes ou braços de quaisquer correntes públicas navegável ou flutuável, as fontes e reservatórios públicos, bem como as nascentes. O domínio era basicamente da União, Estados e dos Municípios, segundo a própria definição territorial de cada um destes entes.

Já a classe de águas comuns era relativa às correntes de água não navegáveis ou fluviáveis, não sendo objeto de domínio algum e consideradas bem de todos. Segundo Milaré (2011), a diferenciação dada a estas duas classes justifica a importância econômica que o respectivo Código deu à navegação e exploração energética do recurso hídrico, limitando seu domínio à União.

Por fim, as águas particulares eram as relacionadas às nascentes e demais córregos ou represas contidas em terrenos particulares que não fossem comuns nem públicas.

Com o advento das legislações ulteriores, não existe mais o direito particular relacionado ao recurso hídrico, uma vez que todas as águas são públicas. Cabe, então, ao poder público disciplinar o direito de acesso e uso do recurso hídrico a depender dos usos que recaiam sobre um determinado corpo hídrico, considerando a bacia hidrográfica como unidade territorial gestora de tomada de decisão.

Não mais subsiste o direito de propriedade relativamente aos recursos hídricos. Os antigos proprietários de poços, lagos ou qualquer outro corpo de água devem se adequar ao novo regramento constitucional e legislativo, passando a condição de meros detentores dos direitos de uso dos recursos hídricos, assim mesmo, desde que obtenham a necessária outorga prevista em lei. (SILVA, 1998 apud MILARÉ, 2011)

Esse quadro só foi possível com o desenvolvimento de uma legislação ambiental concisa com base na sustentabilidade⁶. Este paradigma reafirmou a busca pela qualidade ambiental dos recursos hídricos em detrimento da gestão limitada apenas à quantidade até então vigente. E nesse contexto que a Política Nacional do Meio Ambiente – PNMA, preconizada pela Lei nº 6.938/81, institui entre seus princípios e objetivos a busca pela *racionalização do uso do solo, do subsolo, da água e do ar* (Art. 2, II) e o *estabelecimento de critérios e padrões de qualidade ambiental e de normas relativas ao uso e manejo de recursos ambientais* (Art. 4, III), que dá suporte legal para a concepção de sustentabilidade no uso e gestão dos recursos hídricos.

⁶ Segundo Milaré (2011), o conceito de sustentabilidade pode ser expresso em duas ópticas, a ecológica e a política. Na visão ecológica, o conceito é inerente aos próprios recursos da natureza em seu fluxo dinâmico no interior das cadeias ecossistêmicas, nas quais a existência e perpetuação de alguns desses recursos dependem naturalmente de outros recursos. Já na óptica política, a sustentabilidade representa a capacidade da sociedade de organizar-se por si só. Assim unindo-se estas duas vertentes ter-se-ia a sustentabilidade como a capacidade natural de suporte (recursos naturais existentes) e a capacidade de sustentação (atividades sociais, políticas e econômicas geradas pela própria sociedade em seu próprio benefício). Este conceito no âmbito do “verdadeiro” desenvolvimento, não apenas considerando o mero crescimento econômico, formaria o alicerce básico do desenvolvimento sustentado ou sustentável.

Sendo assim, atualmente os domínios podem ser da União ou dos Estados, e por analogia do Distrito Federal, o que condiciona o usuário a demandar autorização pelo uso da água em determinada bacia, observado a disponibilidade e prioridades relativas aos usos múltiplos da mesma.

Resgatando a temática do Código das Águas, observa-se uma maior preocupação do poder público, à época, na gestão pela *quantidade*, sem grandes preocupações com sua *qualidade*. Destarte, essa gestão era basicamente condicionada às concessões para aproveitamento hidroelétrico, sendo estas de competência exclusiva da União.

2.1.2. Política Nacional do Meio Ambiente – PNMA e o enquadramento dos corpos d'água.

A Política Nacional do Meio Ambiente inovou no que tange a gestão dos recursos hídricos ao reforçar a busca pela manutenção da qualidade dos corpos d'água brasileiros. Ficou a cargo do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, órgão consultivo e deliberativo do Sistema Nacional do Meio Ambiente – SISNAMA, as atribuições de *“estabelecer normas, critérios e padrões relativos ao controle e a manutenção da qualidade do meio ambiente com vistas ao uso racional dos recursos ambientais, principalmente os hídricos”* (BRASIL...Art. 8, VII).

No âmbito de sua competência, o CONAMA editou a Resolução 20, de 18 de junho de 1986, posteriormente revogada pela Resolução 357, de 17 de março de 2005, que inaugurou no âmbito nacional a gestão da qualidade das águas brasileiras, que por sua vez gerou reflexos e influenciou positivamente a elaboração da ulterior Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei nº 9.433/97).

A Resolução 357/2005, exemplo de instrumentalização da PNMA, concebeu a classificação das águas superficiais doces, salobras e salinas do território nacional, segundo os usos preponderantes. Aqui vale lembrar que o dito enquadramento dos corpos d'água não é feito considerando necessariamente o estado atual do ente hídrico, mas sim os níveis de qualidade que deveriam ter para garantir os usos preponderantes deste recurso natural dentro da bacia hidrográfica em questão.

Esta lógica na gestão de recursos hídricos impõe, na prática, a estipulação de metas e ações visando atingir, de modo gradual, os objetivos do enquadramento pretendido. Tais metas e ações deverão ser consideradas em todos os aspectos de

gestão do uso dos recursos hídricos dentro de uma bacia hidrográfica, a exemplo da outorga e cobrança, e as que envolvem gestão ambiental, no que se insere o licenciamento ambiental, o controle das fontes de poluição e o estabelecimento dos termos de ajustamento de conduta - TAC. (MILARÉ, 2011)

A ótica da bacia hidrografia na gestão dos recursos hídricos auxilia no entendimento dos usos preponderantes e dá suporte ao enquadramento, garantindo um dos expressos objetivos da Política Nacional de Recursos Hídricos: os usos múltiplos. Este fato é possível visto a própria natureza dinâmica, considerando as modificações que ocorrem nas linhas divisoras de água sob o efeito dos agentes erosivos (GUERRA *et al.*, 2003) e sistêmica a respeito das bacias hidrográficas, que por sua vez possibilita a estimativa e controle de impactos sinérgicos de um determinado uso e a busca pela harmonização entre os setores demandantes de recursos hídricos.

Portanto, a Resolução CONAMA 357/2005, atendendo os pretextos da PNMA, estabeleceu um razoável sistema de gestão da qualidade da água, porém ainda sem o devido intercâmbio com a gestão quantitativa, supramencionada. É nesse contexto que a Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei nº 9.433/97) busca superar esta gestão até então dicotômica.

2.1.3. Domínio das Águas na Constituição Federal de 1988 e a Política Nacional de Recursos Hídricos

Conforme o novo regramento jurídico introduzido pela Carta de 1988, “inclui-se entre os bens dos Estados: I – as águas superficiais ou subterrâneas, fluentes, emergentes e em depósitos, ressalvadas, neste caso, na forma da lei, as decorrentes de obras da União;...” (BRASIL, 1988 Art. 26). Percebe-se que o inciso envolve todo o ciclo hidrológico e apesar de não expressar limitações territoriais, conclui-se que, ordinariamente, as águas são de domínio dos Estados (MILARÉ, 2011).

Por outro lado, o art. 20 da CF restringe a dominialidade acima mencionada ao dispor que “*são bens da União: (...) III – os lagos, rios e quaisquer correntes de água em terrenos de seu domínio, ou que banhem mais de um Estado, sirvam de limites com outros países, ou se estendam a territórios estrangeiros ou dele provenham,*

bem como os terrenos marginais e as praias fluviais; (...) VI – o mar territorial; (...) VIII – os potenciais de energia elétrica”.

Percebe-se que esta lógica proveniente da Constituição Federal a respeito do domínio dos corpos d’água reforça a previsão de articulação da União com os Estados, o que na prática ocorre, por exemplo, no âmbito dos comitês de bacias. Vale salientar que o domínio dos potenciais hidroelétricos manteve a tradição do já dito Direito das Águas, resguardando certa exclusividade à União no trato do tema, porém não absoluto uma vez que deve haver a articulação prevista pela Constituição Federal, independentemente do domínio das águas.

E com base nesse novo regime jurídico, surge a formulação inovadora da Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída pela Lei 9.433/97, bem como a implementação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos – SINGREH, que foi concebida visando à aproximação da gestão dos recursos hídricos com a gestão ambiental, aumentando a responsabilidade dos agentes das duas políticas nacionais no que tange ao envolvimento ainda crescente da participação das comunidades, em particular as que residam na bacia hidrográfica em questão.

Percebe-se, assim, que a gestão racional (qualidade e quantidade) e moderna dos recursos hídricos é indissociável das práticas preconizadas pelo desenvolvimento sustentável, consistindo de um aparato essencial para a sobrevivência do ecossistema nacional e, por vez, planetário.

Os objetivos da Política Nacional de Recursos Hídricos, de acordo com o art 2, são: assegurar à atual e as futuras gerações a necessária disponibilidade de água com qualidade adequada para seu uso; o uso racional e integrado dos recursos hídricos, com vistas ao desenvolvimento sustentável; a prevenção e a defesa contra eventos hidrológicos críticos, quer sejam de origem natural, quer decorrentes do uso inadequado, não só das águas, mas também dos demais recursos naturais.

Por sua vez, seus fundamentos (Art. 1 da Lei 9.433/97) espelham os objetivos supra mencionados, sendo eles: a água é um bem de domínio público; a água é um recurso natural limitado, dotado de valor econômico; em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais; a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo

das águas; **a bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e a atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos**; a gestão dos recursos hídricos deve ser descentralizada e contar com a participação do Poder Público, dos usuários e das comunidades. São estes fundamentos que darão suporte lógico aos instrumentos instituídos por este mesmo diploma infraconstitucional, tais como a institucionalização dos Comitês de Bacia, das Agências de Águas, bem como dos Conselhos Nacional e Estaduais de Recursos Hídricos.

Observa-se que a própria política por si só reforçou a importância já discutida da utilização da ótica dinâmica e sistêmica das bacias hidrográficas com relação a gestão integrada e participativa dos recursos hídricos.

Por sua vez, os instrumentos de suporte a esta proposta de gestão ambiental são: Planos de Recursos Hídricos; o enquadramento dos corpos d'água em classes; a outorga de direitos de uso; a cobrança pelo uso de recursos hídricos; e, o Sistema Nacional de Informação sobre Recursos Hídricos – SNIRH.

Merecem especial atenção os Planos de Recursos Hídricos, uma vez que esses consistem do documento que versa sobre o manejo do uso dos recursos hídricos, diagnosticando a situação atual deste recurso ambiental, informando sobre a disponibilidade e demanda dos setores envolvidos e pormenorizando, assim, as estratégias do governo para atuação no âmbito dos recursos hídricos.

Esse instrumento, que pode ter como unidade territorial os limites estabelecidos por uma bacia hidrográfica, serve de documento normativo que baliza as prioridades para outorga de direito de uso dos recursos hídricos, segundo os usos preponderantes e consuntivos da unidade territorial envolvida.

Segundo Milaré (2011), foi por meio da concepção de planejamento estratégico que a Lei garantiu a efetiva aplicação de um dos seus fundamentos, o uso múltiplo das águas no processo decisório. Este é um fato renovador com relação ao antigo Código das Águas.

Outro ponto importante consiste que a outorga pelo direito de uso dos recursos hídricos de uma determinada bacia hidrográfica, outro instrumento da Política Nacional de Recursos Hídricos, fica condicionada às informações (disponibilidades e

demandas), respectivo enquadramento e metas apresentadas no Plano de Recursos Hídricos.

Portanto, a legislação atual que disciplina a gestão dos recursos hídricos no Brasil reforça a importância da definição, a mais fidedigna possível, dos limites das bacias hidrográficas, para que assim a implementação de todo o SINGREH possa se tornar uma realidade. E com base nessa demanda por informações altimétricas, faz-se necessário o estudo e elaboração de representações digitais contínuas dos elemento fisiográfico de terreno que influenciam na delimitação das bacias hidrográficas.

2.2. MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO - MDE

O relevo sempre foi um dos fatores preponderantes no processo de ocupação da humanidade, sendo também um agente regulador na distribuição no fluxo de água e energia dentro dos ecossistemas (MARTZ e GARBRECHT, 2000). A água é um dos principais fatores exógenos que modelam o relevo, principalmente em encostas, por meio dos processos erosivos naturais ou causados por atividades antrópicas. Por isso a importância de modelá-lo, considerando-o como uma feição tridimensional, para obter resultados quali-quantitativos com finalidade de subsidiar estudos de problemas de engenharia e ambientais, tal como obter informações numéricas das formas do relevo (PINTO, 1994).

Existem diversas formas de dados para representar o relevo, tais como os provenientes de imageamento interferométrico por radar⁷, a exemplo do SRTM, bem como técnicas mais atuais envolvendo o levantamento a laser LIDAR⁸ (*Light Detection And Ranging*), o último oferecendo uma alternativa para os levantamentos *in situ* e para as técnicas de mapeamento fotogramétrico na aquisição de dados de elevação (MAUNE, 2001). Informações mais detalhadas a respeito destas técnicas serão exploradas em momento oportuno ainda neste capítulo.

⁷ Segundo Jensen (2011), é o processo pelo qual as imagens de radar de um mesmo local no terreno são registradas por antenas em 1) diferentes localizações ou 2) tempos diferentes (Madsen e Zebker, 1998; Rabus *et al.*, 2003; Hodgson *et al.*, 2003). A análise de dois interferogramas permite medidas muito precisas sobre as informações tridimensionais de um dado objeto, bem como o deslocamento de qualquer ponto específico x , y , z encontrado em cada imagem do par interferométrico.

⁸ Segundo Jensen (2011), consiste de um sistema de controle e um transmissor e receptor. Quando a aeronave se move ao longo da linha de voo, pulsos de luz laser são direcionados ao terreno por um espelho com varredura perpendicular a trajetória. A maioria dos sistemas LIDAR usados para mapeamento topográfico utiliza a luz laser no infravermelho próximo, na região de 1040 a 1060 nm (Boland *et al.*, 2004).

Das diversas técnicas tradicionais que extraem as informações altimetrias de restituição analógica ou digital das fotografias aéreas, uma bastante empregada e a modelagem matemática na interpolação dos dados amostrais, que são facilmente implementados em ambiente computacional, resultando na representação digital da variação contínua do relevo no espaço, ou Modelo Digital de Elevação (MDE) (CHAVES, 2002).

Segundo Valeriano e Rossetti (2010), o processo de interpolação, de maneira simples, é a estimativa da informação em locais não observados (não amostrados) a partir de observações (amostras) tomadas em sua vizinhança. Resumidamente, num primeiro momento o pesquisador dispõe de amostras de valores, no caso a altimetria, de postos de coleta, podendo ser provenientes de diversas fontes primárias ou secundárias de dados. Após o processo de interpolação é possível estruturar a informação desejada de modo contínuo no espaço digital, referente aos valores de cada *pixel*⁹ nas linhas e colunas de uma imagem digital. Assim os MDE podem ser estruturados numa representação digital pixel a pixel cujos valores de altimetria podem ser construídos a partir das informações primárias de curvas de nível e pontos cotados (VALERIANO e ROSSETTI, 2010).

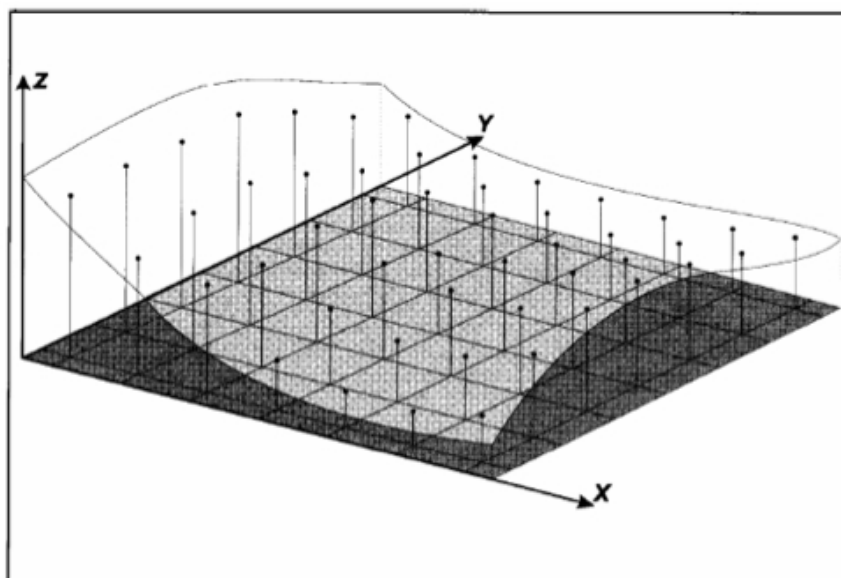
Segundo Felgueiras (1998), para a construção dos MDE's, a partir do processo de interpolação, são necessárias três etapas. A primeira é relativa à coleta/aquisição dos dados altimétricos representativos da variação de altitude no espaço bidimensional, provindos principalmente do mapeamento sistemático brasileiro. A segunda etapa consiste da modelagem dos dados, com a escolha do tipo de grade e do modelo matemático em função do método de amostragem adotado na aquisição dos dados, com o intuito de obter a representação mais acurada e precisa do relevo, esses subdivididos em dois grupos, os globais e os locais. A terceira etapa consiste da aplicação do algoritmo escolhido para a elaboração do MDE, bem como suas aplicações no estudo de aspecto de vertente, declividade, entre outros.

No que diz respeito aos métodos de amostragem inseridos na segunda etapa, os globais utilizam funções polinomiais, séries de Fourier, dentre outras, para a representação do relevo, englobando todos os pontos amostrais da análise no ajuste

⁹ Menor porção do terreno discretizável na imagem ou modelo, havendo uma relação entre este tamanho e a resolução espacial: quanto menor o pixel, maior a capacidade de diferenciar objetos e melhor e esta resolução (permitindo-se trabalhar com escalas maiores por oferecer um melhor detalhamento) (BARROS, 2006)

do melhor modelo matemático a ser utilizado para a representação digital do terreno. Já os locais utilizam fatores, como a distância e a região de interesse, para a escolha de parte do conjunto de dados amostrais para a elaboração dos coeficientes das funções das modelagens matemáticas (CHAVES, 2002).

Segundo a estrutura digital de representação dos MDE's, estes podem ser implementados em malhas regulares ou irregulares. As regulares modelam matematicamente o terreno a partir de representações poligonais como o quadrado e retângulo (SANTOS *et al.*, 2001), sendo essas atualmente bastante difundidas junto aos sistemas de informação geográfica (SAKUDE, 1992). A Figura 2.1 mostra um exemplo de representação em grade regular de uma porção hipotética da superfície.



Fonte: Câmara e Medeiros (1998)

Figura 2.1 – Representação em malha regular (células quadradas) de parte de uma superfície hipotética.

Já os modelos baseados em malhas irregulares ou de Rede Irregular de Triangulação (*Triangulated Irregular Network – TIN*) utilizam triângulos em sua implementação. Esses consistem de triangulações a partir de pontos irregularmente distribuídos pelo terreno com atributos X, Y e Z, que equivalem, respectivamente, à longitude, latitude e altitude. Esse modelo depende do grau do polinômio empregado e da quantidade e qualidade dos pontos utilizados (ARCKERMANN, 1996; SANTOS *et al.*, 2001).

Vale lembrar que nos modelos regulares a resolução espacial, isto é, o tamanho da célula (*pixel*) em X e Y é de suma importância, pois está relacionada diretamente com a exatidão da representação da superfície, tais como a forma de armazenamento do dado, o processo de amostragem e o interpolador utilizado (ESRI, 1996). Assim a escolha da resolução espacial deve estar diretamente relacionada com o objetivo de aplicação do estudo, no caso, com os padrões cartográficos referentes à escala do dado original (BRASIL, 1984 Decreto nº 89.817/84).

Outro ponto importante a ser considerado no âmbito desta discussão é com relação à diferenciação conceitual entre as diversas nomenclaturas que aparecem na literatura referente aos modelos aqui discutidos. Segundo Barros (2006), existe uma variedade de terminologias para designar modelos que representam parte da superfície terrestre, tais como o já citado MDE e suas variantes MDT (Modelo Digital de Terreno), MDS (Modelo Digital de Superfície), MNT e MNE (Modelo Numérico de Terreno e de Elevação, respectivamente), bem como as versões na língua inglesa (DEM, DTM e DSM). Spring (2006) define MNT como a “representação matemática da distribuição espacial de uma determinada característica vinculada a uma superfície real”. Nesta definição nota-se que o MNT pode conter tanto a variação superficial contínua da altimetria, como qualquer outra informação passível de estimativa conforme sua correlação e variação espacial. Já segundo Tommaselli e Santos (2000), MNE pode ser definido como a representação matemática espacial que contém a variação contínua da altimetria relacionadas, ao mesmo tempo, ao terreno e aos objetos existentes sobre eles, ou seja, vegetação e influência antrópica (construções).

No trabalho de Barros (2006), o autor considerou a diferenciação conceitual entre MDE e MDT devido à própria especificidade da pesquisa, que considerou MDE's gerados a partir de plataformas orbitais. Para o autor, MDE significa a representação da superfície do terreno acrescida de quaisquer objetos existentes sobre ela que influenciem no valor de reflectância do pixel, isto é, na ocorrência de árvores e construções os valores indicados de altimetria serão referentes ao topo destes objetos. Os MDT's, por outro lado, seriam as representações reais do terreno.

Considerando Jensen (2011), os MDE's são definidos como um arquivo ou base de dados contendo pontos de elevação numa área contígua (Miller, 2004; Ma, 2005 **apud** Jensen, 2011) e podem ser subdividas em Modelo Digital de Superfície (MDS) e Modelo Digital de Terreno (MDT). Os MDS's corresponderiam aos modelos com informações altimétricas referentes a todas as feições na paisagem, como a vegetação, edifícios e outras estruturas. Já os MDT's seriam referentes aos modelos que contém informação de elevação referente à superfície desnuda da Terra, sem influência dos fatores acima mencionados.

O importante desta diferenciação conceitual depende do objetivo da pesquisa, na qual o pesquisador deve escolher qual nível de acurácia e o mais apropriado para seu objeto de estudo, sendo que a obtenção do MDT pode demandar pós-processamento de ajuste em relação do MDS gerado, referente à extração das influências ocasionadas pela vegetação e feições antrópicas.

Em relação a este projeto de pesquisa, o tema conceitual exposto será tratado conforme definição de Jensen (2011), de uma maneira genérica (MDE) sem entrar as subdivisões (MDS e MDT) elencadas pelo autor. Isto se justifica uma vez que os dados que serão posteriormente descritos no capítulo metodológico utilizam, simultaneamente, dados altimétricos provenientes de imageamento interferométrico por radar e a partir de restituição fotogramétrica.

2.3. GEOESTATÍSTICA, INTERPOLAÇÃO E MÉTODOS DE GERAÇÃO DE MODELO DIGITAL DE ELEVÇÃO (MDE)

2.3.1. Preceitos da Geoestatística e interpolação

Entende-se por Geoestatística o ramo de estudo, no âmbito da geomática ou geoprocessamento, que envolve um conjunto de procedimentos de análise e inferência dos fenômenos espaciais, que apresentam uma dependência espacial, em função de uma autocorrelação no espaço (DRUCK, 2002). Esses procedimentos correspondem à definição de um modelo matemático que expresse esta autocorrelação espacial *a priori* e objetivam representar a variabilidade espacial de um atributo considerando uma superfície contínua, no caso das representações digitais, as estruturas regulares ou irregulares acima discutidas. Esses são procedimentos matemáticos que visam entender a variação e correlação espacial de um atributo e podem ser aplicados, na prática, a qualquer fenômeno, tais como

concentração de poluentes, variação de teor de zinco no solo, representações altimétricas da superfície da terra, entre outros, apesar de terem origem no ramo da mineração (KRIGE, 1951 apud DRUCK, 2002).

Vale ressaltar que antes da etapa de inferência de informações não-observadas relativas ao atributo z em x e y , segundo o conjunto de dados pré-estabelecidos (amostras), faz-se necessário entender a disposição, variação e autocorrelação espacial do conjunto de amostras para melhor adaptar o modelo matemático a ser escolhido à realidade do atributo estudado.

Segundo Druck (2002), esse é denominado procedimento inferencial da estrutura de autocorrelação espacial. Essa análise estrutural é relevante para conhecimento, por parte do analista, do variograma que antecede a etapa inferencial de localizações não amostradas, por exemplo, aplicadas na Krigagem.

Segundo Valeriano e Rossetti (2010), resumidamente a interpolação consiste do procedimento de estimativa da informação em locais não observados a partir de dados observados levantadas em sua vizinhança.

Originalmente, os dados só existem nos postos de coleta, mas após este processo, a informação é estruturada de modo contínuo, formando o mapa da intensidade da chuva. Os métodos de interpolação, de modo geral, envolvem uma expressão numérica entre os pontos (x , y) de valor (z) conhecido para a estimativa dos valores desconhecidos em outros pontos. Assim, a informação geográfica localizada em pontos de observação poderá ser estruturada em linhas e colunas, como imagens digitais. Para isto, é preciso estimar, por interpolação, o valor de cada pixel da imagem, a partir dos dados de entrada. (VALERIANO e ROSSETTI, 2010)

Entendido este princípio fundamental da interpolação, as funções e métodos para o cálculo das localidades não-observadas pode ser concebido de diversas maneiras. Nos Sistemas de Informações Geográficas (SIG), a grande maioria dos programas possibilita ao usuário o acesso a ferramentas de interpolação que possuem a capacidade de gerar imagens numéricas a partir de dados tabulares. Estes *softwares* utilizam funções pré-estabelecidas que ponderam os pontos amostrais a serem utilizados no processo de interpolação a partir de valores *default*, na maioria dos casos. Sendo assim é interessante ao usuário o conhecimento da função a ser utilizada para a parametrização mais acurada do modelo que venha a ser utilizado na interpolação do conjunto de dados amostrais.

Segundo Valeriano e Rossetti (2010), a função geral de interpolação calcula a cota z de um pixel na posição j,k (linha j , coluna k) como uma média ponderada (pesos w_i) entre as cotas de sua vizinhança (z_i) segundo a Equação 1.

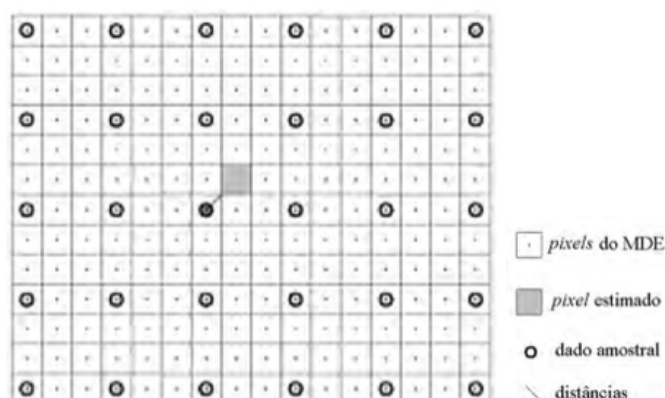
$$Z_{jk} = (z_i \cdot w_i) / (w_i) \quad (2.1)$$

É interessante ressaltar que a variação fundamental que existe entre diferentes resultados de interpolações estão relacionadas à determinação do peso w_i e do conjunto de amostras com seus valores z_i incluídos no cálculo.

2.3.2. Interpoladores

2.3.2.1. Inverso da Distância ponderada (IDW) e Vizinho Mais Próximo

Os preceitos fundamentais, anteriormente mencionados, determinam os conhecidos e amplamente divulgados métodos de interpolação em ambiente SIG, Inverso da Distância Ponderada (IDW) e Vizinho Mais Próximo. Vale ressaltar que alguns teóricos questionam se o último é realmente uma interpolação, uma vez que estima o valor Z diretamente da amostra mais próxima ao ponto de estimativa, reduzindo o conjunto amostral a ser utilizado no cálculo para 1, e não ocorrendo cálculos ponderados entre as amostras para estimativa de pesos. A Figura 2.2 mostra uma representação visual esquemática do método Vizinho Mais Próximo.

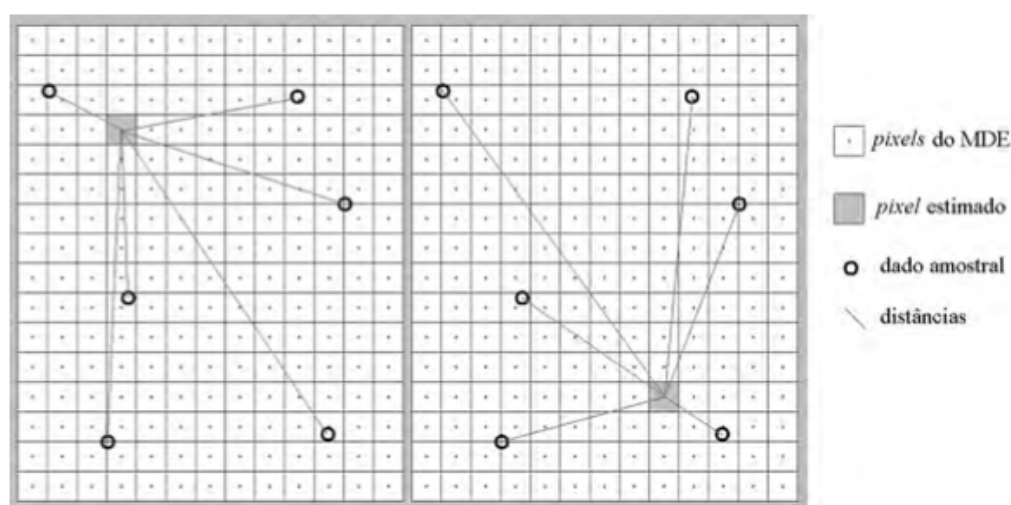


Fonte: modificado de Valeriano e Rossetti, 2010

Figura 2.2 – Representação visual esquemática do método Vizinho Mais Próximo.

Já o método IDW, considerando a formulação geral supramencionada, utiliza o conjunto amostral de valores Z e a relação de distância com o ponto a ser estimado, sendo que esta informação fornece os pesos w_i a serem utilizados na função. Vale

lembrar, conforme o próprio nome, que esta relação de distância e peso é inversamente proporcional, o que ocasiona participação menor de amostras mais distantes do local de estimativa. Segundo ESRI (2010), o método de interpolação IDW determina os valores Z dos pixels que se deseja estimar segundo uma combinação linear ponderada a partir da distância em relação a um conjunto de amostras pré-estabelecidas. A Figura 2.3 mostra a relação da participação das amostras na estimativa do peso w_i , segundo o parâmetro da distância.



Fonte: Valeriano e Rossetti, 2010

Figura 2.3 – Variação da distância de cada amostra em relação ao pixel estimado.

Estes dois métodos são definidos, entre outros, no rol dos interpoladores locais uma vez que utilizam dados próximos ao ponto de estimativa, considerando uma dependência espacial pré-estabelecida. Os já mencionados interpoladores globais, por outro lado, utilizam uma função única de interpolação em toda a extensão de superfície a que se deseja interpolar, tal como a Krigagem. Segundo Valeriano e Rossetti (2010), o conjunto de amostras para a parametrização do modelo escolhido pode conter a totalidade das amostras ou parte delas distribuídas em uma determinada região, sendo que estes métodos geralmente utilizam raios de busca nas amostras que podem ser elipses (dois raios), nos casos em que se deseja expressar variações anisotrópicas, quando a variável apresenta grau de variação dependente de direções (VALERIANO e PRADO, 2001; VALERIANO *et al.*, 2002).

2.3.2.2. Método Krigagem

A Krigagem pode ser definida como um interpolador em que a variabilidade espacial dos dados condiciona a função que relaciona os pesos das amostras as suas distâncias (VALERIANO e ROSSETTI, 2010). A semelhança, ou diferença, dos dados no conjunto de amostras influencia na estimativa da variabilidade espacial de um determinado atributo, segundo suas distâncias. Isto significa que observações mais próximas tendem a ter atributos iguais, e em contrapartida, a variância da estimativa tende a aumentar com o aumento da distância da amostragem.

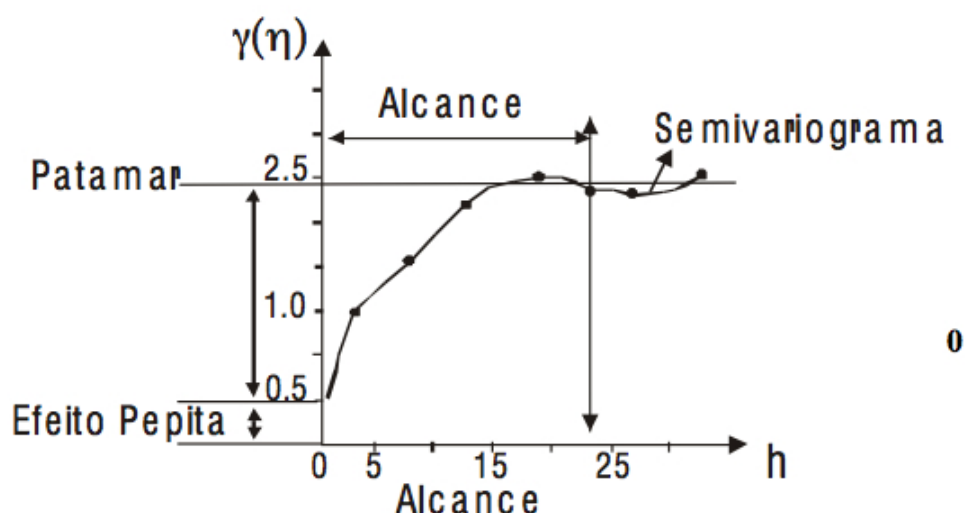
Assim, para a acurada seleção dos parâmetros geométricos a serem utilizados na estruturação espacial dos dados, Cressie (1993, **apud** VALERIANO e ROSSETTI, 2010) aponta passos básicos os quais o analista deve seguir, tais como: (1) Realizar a análise descritiva dos dados com apoio dos semivariogramas, que apresentam a dependência espacial conforme a distância das amostras; (2) Selecionar o modelo espacial teórico que melhor descreve a variabilidade espacial dos dados amostrais, por meio de semelhanças gráfica ou conceitual; (3) Obter os parâmetros do modelo teórico, previamente selecionado, necessários para a etapa de ponderação das amostras na função a ser utilizada no processo de interpolação.

É importante ressaltar que diferentes conjuntos de dados amostrais podem apresentar comportamento espacial diferente, dependendo do modo pelo qual as condições locais controlam o fenômeno em si. Assim, é de suma importância a consideração das etapas supramencionadas no ajuste do modelo teórico adequado, e mais acurado possível, ao comportamento do modelo experimental segundo a variação espacial da amostragem.

No caso específico do método Krigagem, este ajuste e cuidados devem ser adotados na etapa de análise do semivariograma. Este representa a estrutura da variabilidade espacial descrita pela variância estimada (y) em função da distância (x) entre pontos observados (VALERIANO e ROSSETTI, 2010).

Considerando uma situação ideal, o semivariograma apresenta-se como um gráfico crescente, representando a semelhança entre pontos com menor distância tendente ao aumento da variância com o aumento da distância, até um certo ponto (x) que se estabiliza no patamar de máxima variabilidade (y). A partir do conjunto de amostras utilizado é possível estimar o semivariograma experimental que deve

ajustar-se da melhor maneira possível a um modelo teórico de semivariograma (linear, esférico, gaussiano, exponencial, potência), disponível nas ferramentas de geostatística dos programas de SIG. Este ajuste deve ser feito com a parametrização de seus coeficientes numéricos, tais como efeito pepita, patamar e alcance. A Figura 2.4 mostra um semivariograma hipotético com os respectivos coeficientes numéricos.



Fonte: modificado de Drucks, 2002

Figura 2.4 – Semivariograma hipotético com os respectivos coeficientes numéricos.

Segundo Valeriano e Rossetti (2010), o *alcance* é indicado pela distância a partir da qual não é mais considerado o incremento da variância estimada, que atinge o valor do patamar do semivariograma. A partir deste ponto entende-se que não há mais dependência espacial com o ponto no qual quer se estimar, uma vez que sua representação tende a estabilização.

O *efeito pepita* é a estimativa de variância para distância nula, representado no gráfico (Figura 2.6) pela intersecção entre a curva e o eixo y . Segundo Valeriano e Rossetti (2010) este coeficiente numérico corresponde à parte da variabilidade não explicada pela distribuição espacial dos dados, advindas de erros de medições, distância entre amostras ou ainda a característica de variação intrínseca do dado. Assim semivariogramas com *efeito pepita* demandam cuidados maiores, uma vez que grandes coeficientes numéricos desta natureza representam pequena dependência espacial dos dados (VALERIANO e SANTOS, 2002).

Já o *patamar*, resumidamente, corresponde à variação total do conjunto de amostras a ser considerado, que é a soma do *efeito pepita* (caso exista) com a

variabilidade espacial do atributo trabalhado. Uma vez definido e ajustado o modelo experimental a um modelo teórico de semivariograma, os coeficientes numéricos são então fornecidos a função de krigagem, em conjunto com as amostras, servindo de dados de entrada do modelo.

Os dados geoestatísticos são computados nas equações que transformam o modelo teórico ajustado em uma função que relaciona o peso da amostra à distância em relação ao ponto estimado. De modo grosseiro, podemos dizer que a distribuição dos pesos seguirá uma curva semelhante ao semivariograma virado de cabeça para baixo (VALERIANO e ROSSETTI, 2010)

Um ponto importante a ser considerado ao se utilizar o método de interpolação Krigagem requer que hipóteses de estacionaridade dos dados de entrada sejam assumidas para que a estrutura do semivariograma possa ser definida e modelada, uma vez que em cada ponto observado exista uma única observação (BURROUGH, 1987; DAVID, 1997 **apud** DRUCKS, 2002).

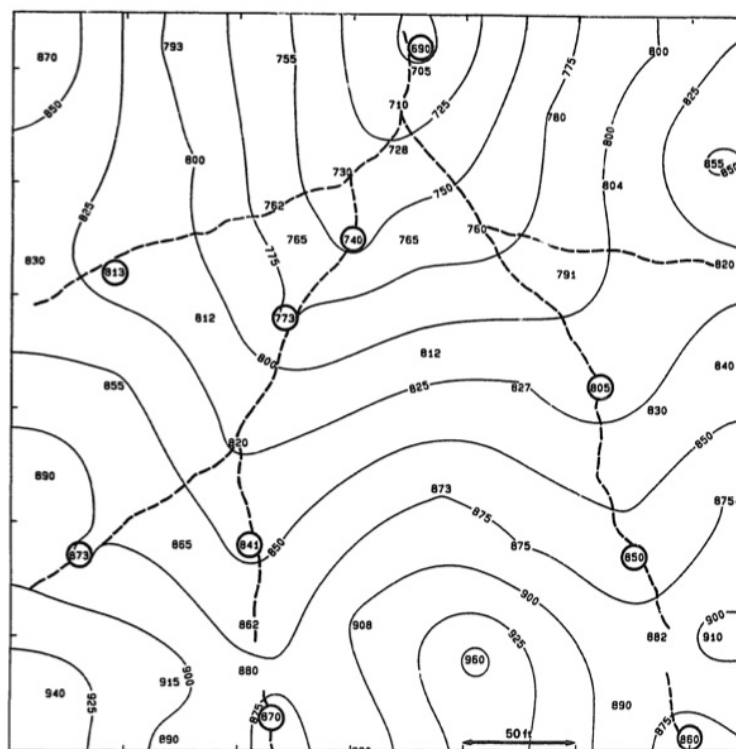
2.3.2.3. Método TOPOGRID

Dentre vários métodos de interpolação, tanto locais, como o IDW, quanto globais (Krigagem e o Spline), o método de interpolação TOPOGRID (HUTCHINSON, 1989) foi especificamente desenvolvido com o objetivo de criação de MDE hidrologicamente consistentes por meio do uso de dados amostrais de elevação e da rede hidrográfica, sendo que esse é otimizado uma vez que possui a eficiência dos interpoladores “locais” sem perder a continuidade do terreno tais como os interpoladores “globais” (HUTCHINSON, 1989).

O interpolador possui tal comportamento devido à aplicação mútua de um interpolador global, para a obtenção dos dados altimétricos, junto a um interpolador local, que possui a função de melhor obter os locais de mudanças abruptas, tais como depressões espúrias, que frequentemente estão associadas a rios e córregos (HUTCHINSON, 1989).

Em linhas gerais, o TOPOGRID realiza a correção hidrológica do modelo e a identificação dos canais de drenagem por meio da aplicação de um algoritmo que tem o objetivo de identificar e eliminar as falsas depressões, que muitas vezes estão associadas a esses canais de drenagem, e são responsáveis pela descontinuidade da rede, aspecto desfavorável em determinados estudos hidrológicos. A Figura 2.5

mostra uma representação hipotética contendo curvas de nível e as depressões espúrias, comumente geradas pelos processos de interpolação.



Fonte: Adaptado de Hutchinson, 1989

Figura 2.5 – Representação hipotética do relevo contendo curvas de nível, depressões espúrias (círculos pretos) e canais de drenagem (linhas tracejadas)

As características morfométricas de elevação de cada célula (pixel) da malha regular são interpoladas por meio de diversas interações, determinadas pelo usuário. O interpolador inicialmente gera uma matriz-base preliminar para, sucessivamente, calcular resoluções mais afinadas até atingir a resolução espacial determinada pelo usuário (HUTCHINSON, 1989), sendo que a incorporação de dados vetoriais da rede hidrográfica no processo possibilita a elaboração de MDE's que representem com mais acurácia o relevo e, conseqüentemente, o comportamento superficial da água.

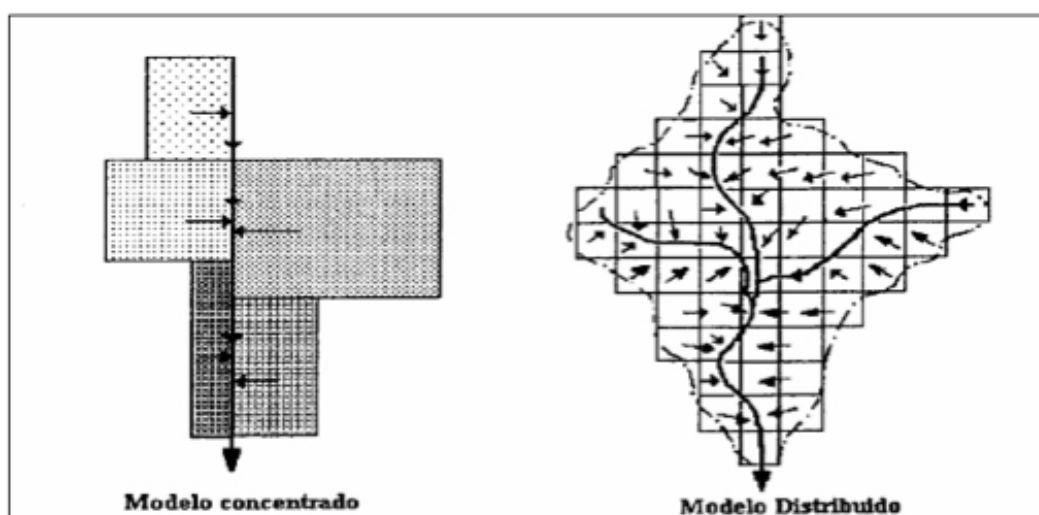
O interpolador permite ao usuário acesso a dados secundários relativos ao processo de interpolação, tais como depressões espúrias preenchidas, hidrografia digital gerada e utilizada na modelagem, arquivo diagnóstico da relação das depressões e picos espúrios remanescentes e os parâmetros utilizados, em formato texto.

Porém, essa etapa não garante a total consistência hidrológica do modelo, devido à geração de depressões espúrias remanescentes no decorrer do processamento, sendo necessária uma etapa de pós-processamento, em que se realizará a consistência hidrológica.

2.4. MODELAGEM HIDROLÓGICA

Visto que a água é um dos principais fatores erosivos do relevo, o estudo de seu comportamento e consequências sobre a superfície pode ser feito com o auxílio dos modelos matemáticos, sejam distribuídos ou concentrados.

Os concentrados subdividem a bacia hidrográfica em blocos irregulares, nos quais a variabilidade espacial dos elementos em análise é muitas vezes tratada por meio de seus valores médios. O modelo distribuído subdivide a bacia hidrográfica, por sua vez, em células menores e regulares, nas quais os elementos em análise são homogêneos no interior de cada célula (CHAVES, 2002). Esses são facilmente representados pelos modelos no formato de matriz regular, sendo que sua escolha está diretamente ligada à sua simplicidade de armazenamento, isto é, ao fato das coordenadas x e y estarem implícitas na própria matriz do modelo, além de proporcionar maior facilidade de implementação de algoritmos. A Figura 2.6 mostra uma representação básica da estruturação dos modelos hidrológicos.



Fonte: Mendes (1996)

Figura 2.6 – Representação da estruturação, concentrado e distribuído, dos modelos hidrológicos.

Independente da estruturação do modelo, distribuído ou concentrado, todo modelo hidrológico deve ter parâmetros de calibração, tais como a identificação da drenagem numérica¹⁰, que são obtidas com o auxílio dos MDE.

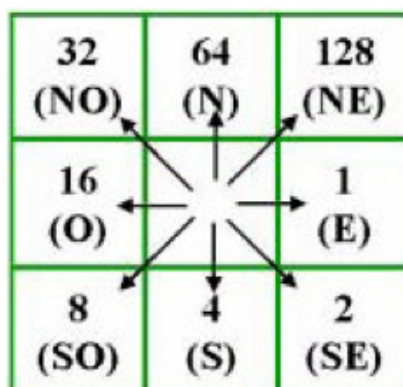
Um dos pontos básicos ao se trabalhar com modelos hidrológicos consiste na representação fidedigna tanto do relevo, como da estrutura hidrológica presente. Sendo que esse último quesito implica em obter a máxima coincidência entre o trajeto de escoamento superficial da água no modelo, obtido de forma matemática, com a hidrografia mapeada em questão (HUTCHINSON *et al.*, 1996 **apud** RUBERT *et al.*, 1999).

Uma proposta é baseada na construção da drenagem numérica a partir da simulação do caminho preferencial de escoamento superficial da água sobre o modelo matemático de elevação, no formato regular. Para tal é de suma importância identificar o caminho preferencial descendente do fluxo superficial de cada célula do modelo. Existem diversos trabalhos sobre essa abordagem, tais como Quinn (1991), Lea (1992), Costa-Cabral (1994), entre outros. Os que serão aqui abordados são o de fluxo de direção D8, proposto inicialmente por O'Callaghan e Mark (1984), e o de fluxo direcional D^∞ (TARTOBON, 1997).

2.4.1. Modelo de direção de fluxo D8

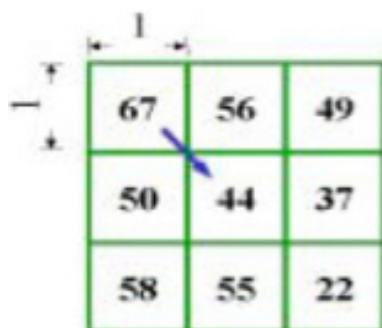
O método de única direção, conhecido como D8 (determinístico de 8 células), determina a direção preferencial do escoamento superficial da água, adjacente ou diagonal, por meio da direção de maior declive, entre pixel central e as oito células vizinhas no MDE (TARBOTON, 1997), ou seja, as oito direções – norte, nordeste, leste, sudeste, sul, sudoeste, noroeste e oeste (Figura 2.7). A utilização de modelos que visam estimar o comportamento preferencial de escoamento superficial da água sob o terreno tem importância nos mais diversos tipos de modelagens hidrológicas, tais como estudos de saturação de solo, propensão a alagamento e zonas susceptíveis a erosão, entre outros. A Figura 2.8 mostra a metodologia adotada para a escolha do caminho preferencial, de acordo com os dados de declividade.

¹⁰ Comportamento do fluxo superficial da água no modelo matemático.



Fonte: Chaves, 2002

Figura 2.7 – Ilustração das oito possibilidades de escoamento superficial para cada célula do modelo, método D8.



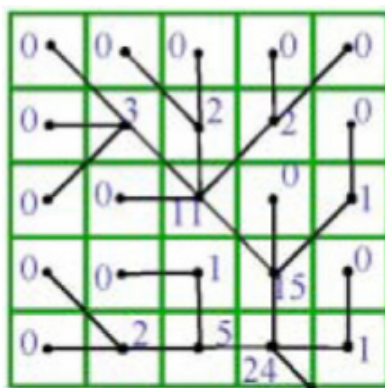
Fonte: Modificado de Ribeiro (2000)

Figura 2.8 – Cálculo de declividade na escolha do caminho preferencial do fluxo de água em um MDE hipotético. A direção é determinada em relação à célula que apresenta a maior declividade à célula de referência.

O fluxo acumulado do método D8 consiste na área de drenagem a montante para cada célula do MDE. Segundo Wallis *et al* (2009), a área de contribuição de um determinado *pixel* corresponde à sua própria área acrescido das áreas dos *pixels* vizinhos que drenam para ele. A Equação 2 expressa a lógica de área de contribuição implementada.

$$A(x_i) = 1 + \sum_N A(N) \quad (2.2)$$

A Figura 2.9 mostra o modelo de acumulação do fluxo direcional D8, bem como os valores da área de drenagem, expresso em valor de células.



Fonte: Chaves (2002)

Figura 2.9 – Modelo hipotético de acumulação do fluxo direcional do método D8

Porém, a grande dificuldade de implementação do método D8 para as estimativas de área de contribuição é a presença de depressões espúrias no MDE, inerente ao próprio método de interpolação, que por sua vez devem ser previamente corrigidas, já que estas podem ocasionar a mudança de direção, de forma significativa, no escoamento superficial.

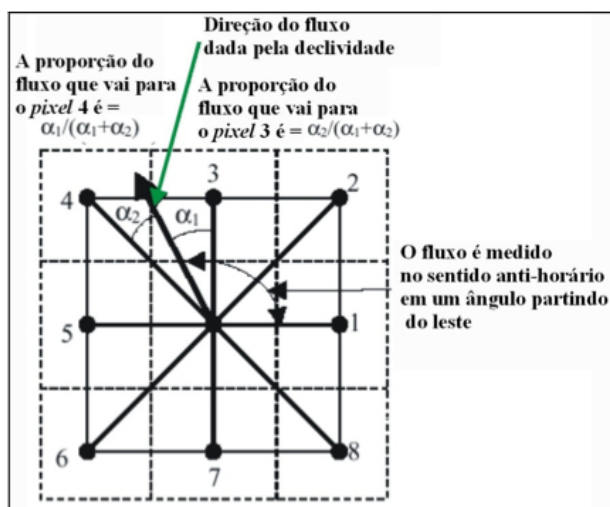
2.4.2. Modelo de direção de fluxo D^∞

Outra proposta mais recente de cálculo de fluxo é conhecida como D^∞ , desenvolvido por Tarboton (1997). Diferente do método D8, tal procedimento considera oito triângulos para uma janela de 3x3, centralizado na célula de interesse. Quando o fluxo superficial no modelo não segue as direções cardinais (0, $\pi/2$, π , $3\pi/2$) e diagonais ($\pi/4$, $3\pi/4$, $5\pi/4$, $7\pi/4$) é adotado um sistema proporcional que pondera o fluxo segundo o ângulo entre o escoamento identificado e o caminho preferencial (cardinal ou diagonal) mais próximo a esse.

Diferente do método D8, certa dispersão é introduzida no processo devido à proporcionalidade de distribuição do fluxo entre as duas células a jusante, uma vez que esse cálculo ponderado é realizado dentro de um dos oito triângulos no qual o fluxo coincidir (TARBOTON, 1997).

A Figura 2.10 ilustra o método D^∞ sob um modelo hipotético de 9 células. O vetor de direção de fluxo superficial é dado entre um dos 8 triângulos formados pelos centroides das células, conforme a estimativa de maior declividade. Uma vez identificado o respectivo triângulo de escoamento, o escoamento superficial para as

duas células a jusante é ponderado dentro de um patamar de 45° , conforme ilustrado.

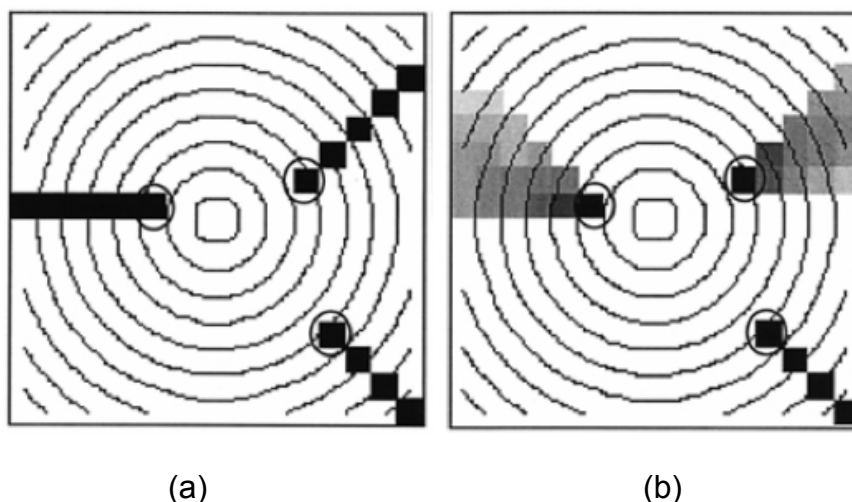


Fonte: modificado de Tarboton (1997)

Figura 2.10 – Método D^∞ de fluxo o qual adota o caminho preferencial de acordo com a declividade.

Quando a direção de fluxo no cálculo acima apresentado é semelhante às direções cardinais e diagonais (referente aos lados dos 8 triângulos formados), a resposta do método D^∞ será igual ao esperado pelo método D8, e ambos estão corretos. Entretanto, quando a declividade topográfica não está alinhada com tais eixos, o resultado é bem diferente. Assim o D8 não produz nenhuma dispersão de fluxo enquanto o D^∞ introduz alguma (TARBOTON, 1997).

A Figura 2.11 mostra a comparação do escoamento utilizando os dois métodos em uma mesma matriz hipotética.



Fonte: modificado de Tarboton (1997)

Figura 2.11 – Comparação de métodos de direção de fluxo. (a) Única direção, D8. (b) Duas direções D^∞ .

Observa-se o mesmo comportamento de direção no canto direito inferior, devido à equivalência entre declividade na matriz e a direção (diagonal) de fluxo no método D^∞ .

2.5. SENSORIAMENTO REMOTO E OS MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO (MDE)

2.5.1. Sensoriamento Remoto

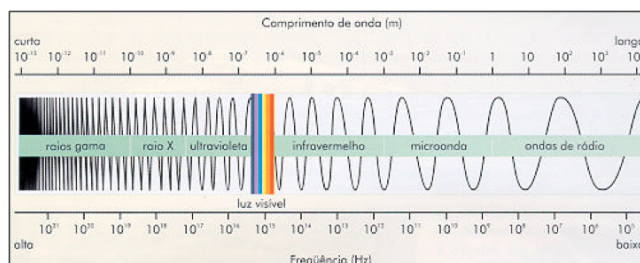
O conceito de Sensoriamento Remoto é muito amplo para atender aos propósitos e preocupações apresentadas nesta pesquisa. Elachi (1987, **apud** NOVO, 2008) conceitualiza esta técnica, amplamente difundida, como sendo a aquisição de informações sobre um objeto sem que se entre em contato físico com ele. Devido à conotação ampla introduzida pela definição, o mesmo limita a definição de sensoriamento remoto como a obtenção de informações a partir da detecção e mensuração das mudanças que um determinado objeto impõe aos campos de força que o circundam, sejam estes campos eletromagnéticos, acústicos ou potenciais (NOVO, 2008).

Porém, mesmo com esta limitação conceitual imposta pelo autor mencionado, o conceito ainda é muito amplo para abarcar as técnicas que serão posteriormente discutidas de elaboração de MDE por meio de técnicas de Sensoriamento Remoto. Assim, Novo (2008), tendo como foco a aquisição de informações a respeito dos recursos terrestres, limita o sensoriamento remoto, seus princípios e aplicações,

como sendo a aquisição de informações sobre objetos a partir da detecção e mensuração de mudanças que estes impõem ao campo eletromagnético, excluindo os sensores acústicos e sísmicos. Outra definição próxima à adotada é a de Câmara *et al* (1996), que remete ao conjunto de técnicas usadas para medir propriedades eletromagnéticas de uma superfície ou objeto, sem que haja contato entre o objeto e o equipamento sensor. Mas daí surge o questionamento da utilização da energia eletromagnética como meio de obtenção de informações a respeito dos recursos terrestres.

A utilização do espectro e da energia eletromagnética no viés do sensoriamento remoto pode ser explicada, uma vez que toda matéria com temperatura absoluta acima de zero (0 graus Kelvin) emite este tipo de energia, podendo-se concluir que todos os objetos presentes na superfície terrestre emitem energia, sendo considerados fonte de radiação (NOVO, 1992) cuja propagação acontece por meio de ondas eletromagnéticas.

Outro ponto positivo na utilização desta grandeza no sensoriamento remoto é a capacidade da radiação eletromagnética não necessitar de um meio de propagação, tal como o som necessita. Este segundo ponto apresentado possibilitou que sensores capazes de fazer medições utilizando a energia eletromagnética pudessem ser colocados cada vez mais distante dos objetos a serem medidos, até que passaram a ser colocados em satélites com o advento e avanço da tecnologia espacial. Esta nova tendência orbital acentuou a conotação de distância física a palavra “remoto”. A Figura 2.12 mostra o espectro eletromagnético¹¹ conforme o comprimento de onda e a frequência.



Fonte: Florenzano, 2002

Figura 2.12 – Espectro eletromagnético

¹¹ É um *continuum* de todos os comprimentos de onda, agrupados segundo intervalos com determinadas características que recebem denominações. As diferenças entre os comprimentos de onda variam desde nanômetros (nm), como ondas de raio gama, até quilômetros (km), como as ondas de rádio longas.

A origem do sensoriamento remoto nos remete de volta ao século XIV com o advento da câmara escura de Aristóteles. Porém, próximo à concepção moderna de sensoriamento remoto, o primeiro avanço no tocante destas técnicas foi possível na metade do século XIX com o surgimento da fotografia. Pela primeira vez era possível capturar permanentemente e objetivamente imagens relativas ao comprimento de onda do visível (0,3 a 0,7 μm). Adicionalmente a este fato, durante todo o século XIX novas formas de radiação eletromagnética foram descobertas além do intervalo do visível – infravermelho por Herschel, ultravioleta por Ritter e ondas de radio por Hertz. Em 1863, Maxwell desenvolveu a teoria eletromagnética que muito embasa o entendimento dos fenômenos naturais (REES, 2001).

O avanço da fotografia e reconhecimento aéreo foi possível, e quase simultâneo, à descoberta dos métodos fotográficos. A primeira foto aérea foi provavelmente feita em 1858 por Gaspard Felix Tournachon, de um balão a uma altitude de 80 metros. O caminhar para o que se conhece como “sensoriamento remoto” foi possível com os avanços das aeronaves provenientes pelas duas grandes guerras, principalmente a Segunda Guerra Mundial. Nesta guerra houve um substancial desenvolvimento do reconhecimento por fotografia aérea e fotogrametria, bem como instrumentos sensores sensíveis ao infravermelho e sistemas radar¹² utilizados para a vigilância e localização de alvos militares (REES, 2001).

Em 1950, filmes falsa-cor utilizando comprimento de onda no infravermelho foram utilizados, originalmente elaborados para uso militar, em aplicações envolvendo mapeamento de vegetação, e também, começa o desenvolvimento sistemas radar de alta resolução. Com o advento da corrida espacial, em 1960 os sensores até então conhecidos foram colocados em plataformas orbitais, aproximando-se da moderna concepção de sensoriamento remoto. O ponto marcante foi o lançamento e operacionalização bem sucedida do satélite ERTS (*Earth Resources Technology Satellite*) desenvolvido pela NASA (*US National Aeronautics and Space Administration*) renomeado, mais tarde, para Landsat 1, sendo que o programa Landsat ainda continua em operação até os dias de hoje

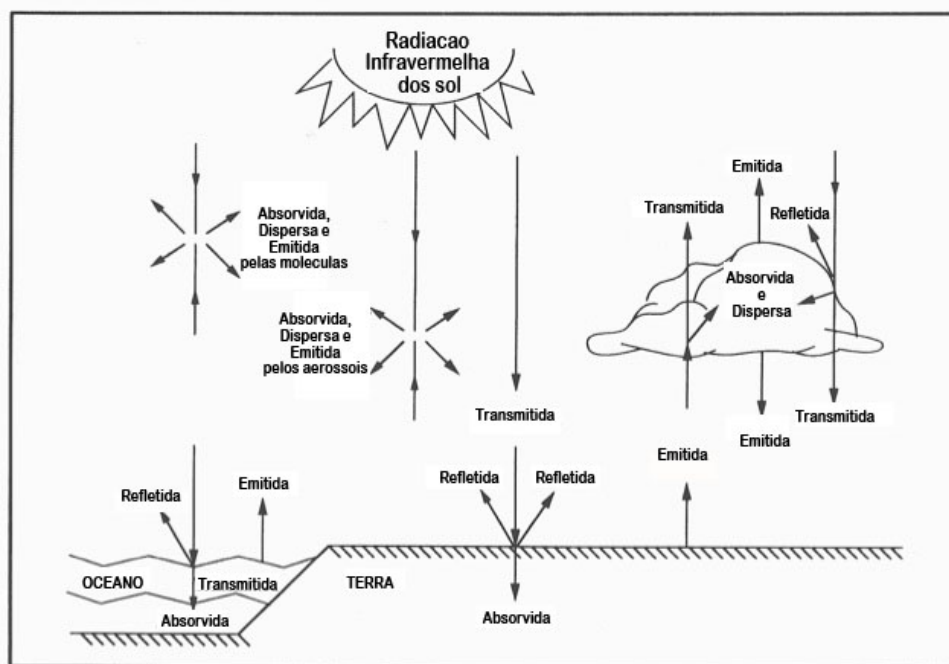
¹² Segundo Jensen (2011), acrônimo de “**R**adio **D**etection **A**nd **R**anging” foi inicialmente estudado por A. H. Taylor e L.C. Young, em 1922. Os primeiros testes utilizavam ondas de radio para a detecção de objetos de interesse, porém atualmente estes sistemas trabalham com ondas no comprimento do micro ondas. O acrônimo nunca foi alterado.

(JENSEN, 2011), com a plataforma Landsat 5, cuja operação foi finalizado em novembro de 2012, Landsat 7, iniciado em 1999 e finalizado em 2003, e mais recentemente, o planejamento para lançamento futuro da plataforma Landsat 8, previsto para o final de 2013.

Após o lançamento do ERTS, houve um crescimento acentuado no número e diversidade de sistemas sensores aerotransportados, bem como em plataformas orbitais. Este fato só foi possível com o advento e desenvolvimento dos sistemas computacionais e do aumento na capacidade de armazenamento dos dados (REES, 2001), bem como da utilização da radiação eletromagnética como mediatrix de acesso remoto a informações dos recursos naturais.

Assim, resumidamente, as informações a respeito dos recursos naturais presentes na superfície da Terra, bem como na atmosfera do planeta, são obtidas a partir da mediação do valor de radiação eletromagnética (reflexão ou emissão) que chega ao sensor proveniente de um objeto de interesse, cujo aparato imageador pode estar a bordo de uma aeronave ou de uma plataforma orbital. A intensidade do sinal registrado não depende somente das propriedades dos alvos e da configuração do sensor utilizado, mas também do nível em que foi feita a aquisição dos dados, o que está intimamente ligado a distância do sensor em relação a superfície imageada (NOVO, 1992).

A radiação que atinge o sensor é fruto da reflexão de alvos com relação à emissão proveniente de uma fonte de energia, que pode ser do próprio sensor (sensores ativos) ou externa (sensores passivos), no caso o Sol. A Figura 2.13 mostra um esquema simplificado que ilustra as interações da radiação eletromagnética no comprimento de onda do infravermelho desde a fonte geradora, o Sol, até a incidência no sensor.



Fonte: Adaptado de BARROS, 2006

Figura 2.13 – Interação sofrida pela radiação eletromagnética, no comprimento de onda do infravermelho, durante o trajeto Sol – sensor.

Os sensores podem ser sistemas ativos, quando estes geram sua própria fonte de radiação eletromagnética, como os sistemas radares, ou sistemas passivos que recebem a radiação proveniente do Sol após todas as interações possíveis na atmosfera e com os objetos da superfície, tais como o Landsat, CBERS¹³, entre muitos outros. Segundo Rees (2001), os sensores passivos podem ser subdivididos naqueles que detectam a radiação proveniente do Sol e aqueles que detectam a radiação térmica emitida naturalmente por todos os objetos acima do zero absoluto. Assim sensores, sejam eles passivos ou ativos, detectam a radiação eletromagnética depois da interação ou emissão da mesma pelo alvo de interesse, sendo que as duas variáveis coletadas são: (1) quantidade de energia no retorno em relação à emissão inicial; (2) o tempo de duração entre o pulso inicial e o captado pelo sensor.

Estas variáveis são trabalhadas dependendo do objetivo do trabalho, do alvo que se esteja pesquisando e dos comprimentos de onda envolvidos. No caso do presente trabalho é de suma importância a compreensão da maneira como é possível extrair informações altimétricas da superfície a partir dos pressupostos aqui

¹³ Programa espacial brasileiro de observação dos recursos terrestres

explanados, a saber: (1) a aerofotogrametria; (2) Imageamento Interferométrico por Radar.

2.5.2. Fotogrametria e os MDE's

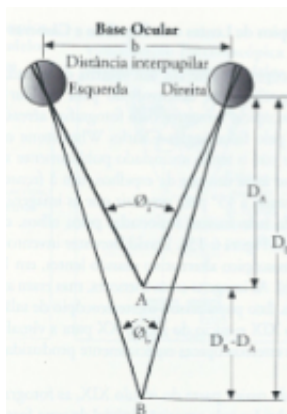
Os dados de altimetria usados na geração de MDE podem ter diversas origens, entre elas as provenientes da utilização de técnicas de Sensoriamento Remoto. Classicamente estes dados são obtidos a partir de levantamentos topográficos e/ou aerofotogramétricos, sendo normalmente representados em curvas de nível e pontos cotados. Segundo Jensen (2011), a fotogrametria é a arte e a ciência de realizar medições precisas por meio de fotografia aérea, podendo ser subdividida em fotogrametria analógica ou digital.

A fotogrametria analógica utiliza dados em formato palpável, tais como fotografias aéreas impressas em papel fotográfico de 23x23 cm ou então cópias em transparência positiva (diafilmes ou diapositivos). Já a fotogrametria digital é realizada usando-se um computador e fotografias aéreas digitais ou digitalizadas¹⁴. Vale ressaltar que nenhum dos métodos é superior ao outro, sendo que a facilidade computacional ampliou e difundiu o uso destas técnicas de medição no uso civil.

Dentro do escopo da aerofotogrametria podem ser extraídas informações quantitativas relacionadas a medições a depender do método utilizado, que variam da utilização de uma simples fotografia aérea vertical ou o uso de múltiplas fotografias aéreas estereoscópicas (sobrepostas entre si), esta última com relação a métodos que envolvam o estudo da paralaxe estereoscópica.

Segundo Jensen (2011), a estereoscopia é a ciência da percepção de profundidade usando-se os dois olhos humanos (visão binocular). Quando estes estão focalizados sobre um determinado ponto, os eixos ópticos convergem para aquele ponto, formando um *ângulo paralático* (\emptyset), sendo que diferenças nestes ângulos levam o cérebro a interpretar distâncias. A Figura 2.14 apresenta um esquema explicativo a respeito do *ângulo paralático* (\emptyset) e a questão da distância/profundidade de uma paisagem.

¹⁴ Processo pelo qual dados analógicos são transformados em matrizes regulares digitais com o uso de scanners.



Fonte: modificado de Jensen (2011)

Figura 2.14 – Representação esquemática do *ângulo paralático* (\emptyset) e sua relação com a distância/ profundidade de uma paisagem.

A seguir, encontram-se listadas as medições possíveis de mensuração com relação a cada método mencionado (JENSEN, 2011).

Única e Simples fotografia aérea vertical

- Escala da fotografia;
- Altura do objeto;
- Comprimento do objeto;
- Área de um objeto ou polígono;
- Perímetro de um objeto ou polígono;
- O tom em escala de cinza ou cor de um objeto;

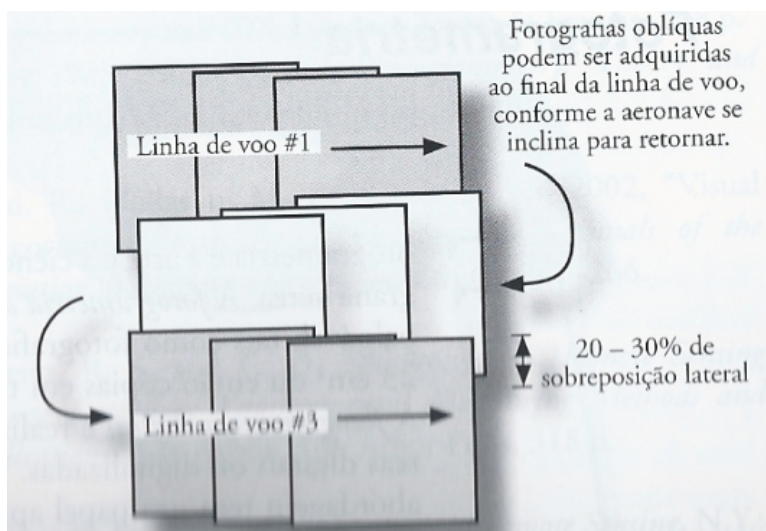
Múltiplas fotografias aéreas estereoscópicas

- Localização planimétrica (x, y) precisa de objetos, como projeção horizontal de edificações, vias, hidrografia e linhas costeiras em uma projeção cartográfica padrão;
- Altura precisa de um objeto (z);
- **Modelos digitais de Elevação (MDE);**
- Modelos Batimétricos;
- Informação de declividade e orientação de vertentes derivadas dos modelos digitais de elevação e batimétricos;
- Ortofotos com acurácia planimétricas (x, y);

Vale ressaltar que grande parte dos métodos envolvidos na extração das medições acima mencionadas envolve cálculos de trigonometria sobre a fotografia,

seja analógica ou digital. Como o campo de interesse da presente pesquisa se limita a extração de dados altimétricos contínuos (MDE) da superfície, a discussão seguinte se limitará as técnicas envolvendo a estereoscopia e a estimativa da paralaxe.

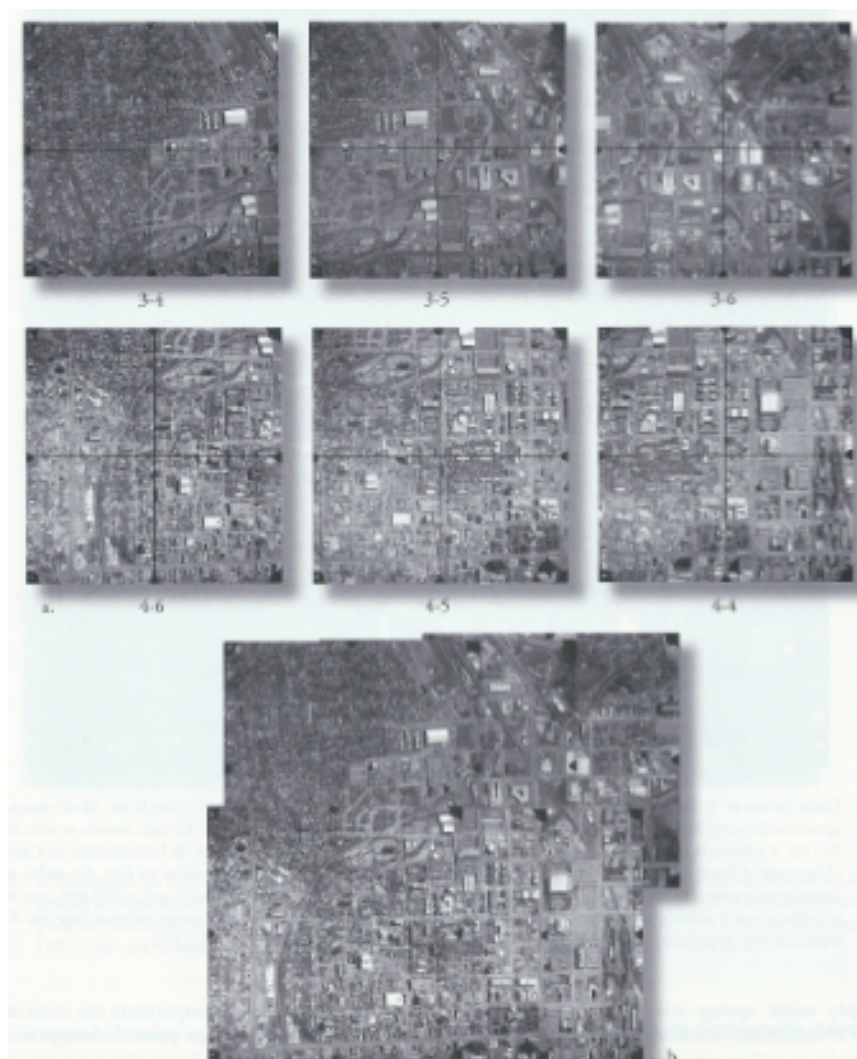
A maior parte dos levantamentos por fotografia aérea necessita de múltiplas linhas de voo para recobrir a totalidade da área de interesse a ser levantada a informação. Ao tratar das linhas de voo, principalmente para as técnicas que envolvam o estudo da estereoscopia, é necessário ocorrer a sobreposição lateral entre as fotografias adquiridas em cerca de 20 – 30%, sobreposição lateral entre linhas de voo, e 60% de sobreposição lateral entre as fotografias de uma mesma linha de voo (JENSEN, 2011). As medições mencionadas são mais bem estimadas com fotografias próximas a visada vertical ($\leq 3^\circ$ do nadir¹⁵). A Figura 2.15 mostra uma representação da estrutura de blocos de fotografias necessária no levantamento estereoscópico da superfície de interesse. A Figura 2.16 traz um exemplo de levantamento em duas linhas de voo (linha 3 e 4) com 3 fotografias verticais cada.



Fonte: modificado de Jensen (2011)

Figura 2.15 – Representação da estrutura de blocos de fotografias utilizadas em levantamentos aerofotogramétricos.

¹⁵ É o ponto da esfera terrestre diretamente abaixo do observador, neste caso do sensor.



Fonte: modificado de Jensen (2011)

Figura 2.16 – Exemplo de aerolevantamento utilizando duas linhas de voo (linha 3 e 4) com três fotografias verticais cada.

Cada fotografia registra a posição exata dos objetos presente na cena no momento da exposição¹⁶. No caso das múltiplas fotografias com sobreposição de 60%, o registro da superfície de interesse é captada a partir de diferentes pontos de perspectivas, uma vez que a aeronave, ou plataforma orbital, moveu-se centenas de metros na linha de voo, ou na órbita, entre as exposições. Este efeito causa nos objetos com altura nas fotografias uma mudança de posição de uma fotografia para a seguinte, em relação ao seu fundo, efeito este conhecido como *paralaxe estereoscópica*. Segundo Jensen (2011), a *paralaxe* é o deslocamento aparente na posição de um objeto, com respeito a uma estrutura de referência, causado pela alteração na posição de observação, sendo uma característica normal a fotografias

¹⁶ Momento que o sensor capta a radiação eletromagnética refletida da superfície de interesse.

aéreas e base para a visualização e extração de informações estereoscópicas tridimensionais. Assim a diferença entre as paralaxes dos objetos de determinada superfície (*paralaxe diferencial*) podem ser usadas para medir a altura de objetos e extrair informações topográficas, como curvas de nível a partir de fotografias aéreas por meio de instrumentos estereoscópicos. Estes são os pressupostos básicos para a criação de quase todos os mapas topográficos planialtimétricos (x , y e z) e mapas planimétricos (x , y).

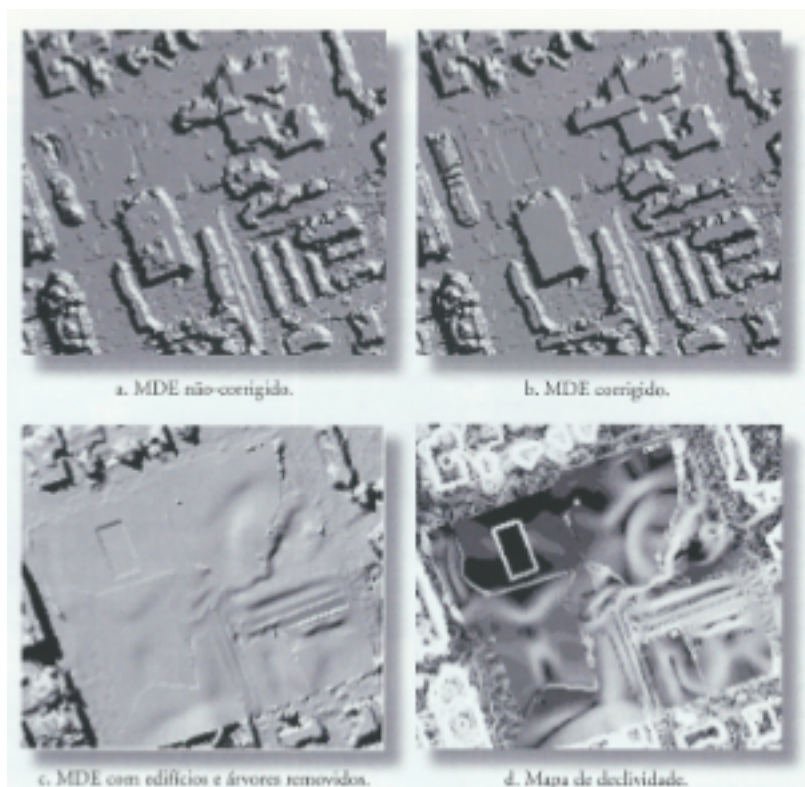
Esta é a base conceitual que aplicada a fotografia aérea permite a extração de MDE a partir da restituição de curvas de nível e pontos cotados de controle. Este procedimento é possível numa matriz regular digital uma vez que a elevação (na verdade, certa quantidade de paralaxe) é atribuída a cada par conjugado de pixels encontrado em um modelo estéreo, sendo que a elevação será extraída do modelo estéreo triangulado construído (JENSEN, 2011). São necessárias algumas etapas para a elaboração de um MDE utilizando-se técnicas estereoscópicas.

- Coleta de pontos de controle no terreno;
- Aquisição de fotografia aérea estereoscópica e outros dados de sensores remotos;
- Tecnologia de digitalização de imagens;
- Programas de fotogrametria digital;
- Extração de cotas altimétricas de referência, curvas de nível e modelos digitais de elevação;
- Criação de ortoimagens digitais;
- Extração de atributos temáticos de interesse;

Assim usando sistemas de fotogrametria digital, controle no terreno e informações de calibração da câmera, é possível realizar aerotriangulação¹⁷ da fotografia (ou de imagens) e utilizar a informação obtida durante o processo para gerar uma grade regular de valores de elevação dentro de cada modelo estéreo de uma linha de voo (JENSEN, 2011), lembrando que para cada valor os mesmos valores de paralaxe encontrados nos pixels conjugados dos pares estéreo estão correlacionados a mesma altimetria.

¹⁷ Processo pelo qual as coordenadas no terreno X , Y e Z podem ser determinadas para qualquer pixel no par estéreo com base em medições das coordenadas da foto (WOLF e DEWITT, 2000).

Neste ponto volta-se a discussão da diferença entre MDS e MDT anteriormente mencionado. Devido ao método apresentado, o MDE extraído terá informações altimétricas correspondentes, em alguns locais, a influência de feições antrópicas, tais como edifícios e pontes. Para a extração de um MDE com a representação do terreno desnudo (MDT) faz-se necessário etapas de pós-processamento e edição. A Figura 2.17 ilustra a necessidade de edição ao MDE gerado por par estereoscópico.



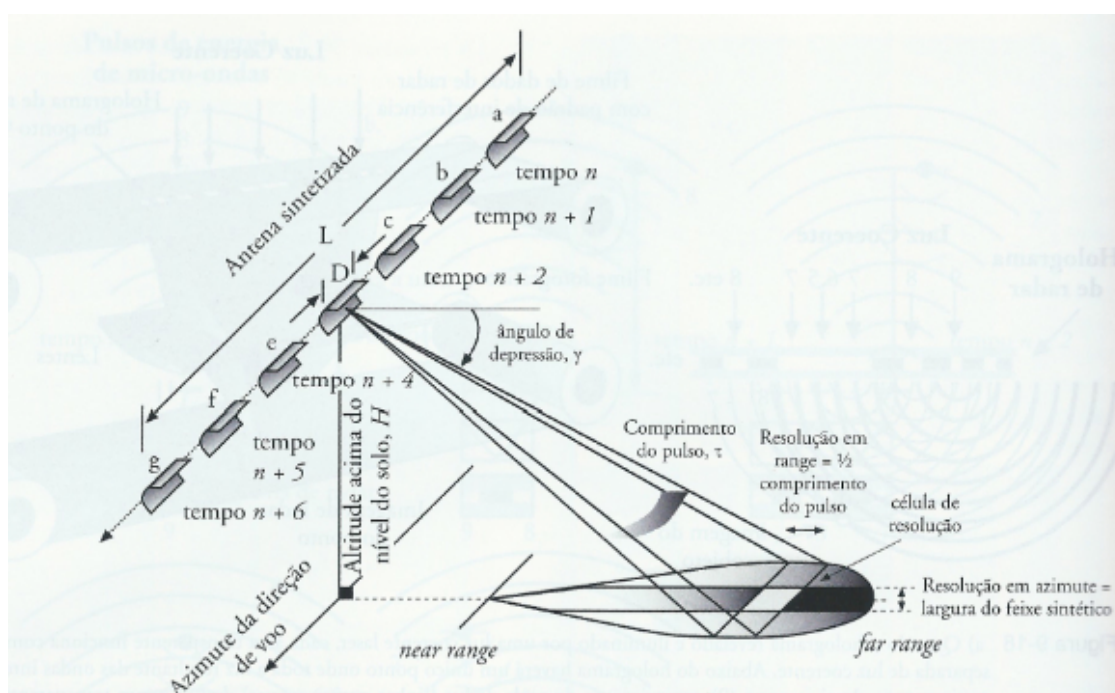
Fonte: modificado de Jensen (2011)

Figura 2.17 – Ilustra a necessidade de edição e pós-processamento no MDE extraído utilizando técnicas estereoscópicas. (a) MDE não-corrigido derivado de técnicas de fotogrametria digital; (b) MDE corrigido; (c) MDE com árvores e edifícios removidos; (d) Mapa de declividade produzido a partir do MDE com edifícios e árvores removidos.

2.5.3. Imageamento Interferométrico por Radar e os MDE

A estereoscopia é uma das técnicas mais conhecidas e utilizadas na obtenção de informações altimétricas com base em fotografias aéreas ou orbitais, como já visto. Porém é possível extrair, também, MDE a partir de múltiplas imagens sobrepostas de levantamentos SAR (*Synthetic aperture radar*). Segundo Jensen (2011), o principal avanço no sensoriamento remoto por radar foi a melhoria obtida na resolução espacial através do desenvolvimento do *radar de abertura sintética*

(SAR). Sabe-se que o tamanho da antena utilizada no levantamento por radar é inversamente proporcional à largura angular do feixe de radar que atingirá o terreno, sendo que um aumento expressivo do tamanho da antena consequentemente refinaria a resolução em azimute das imagens obtidas. Assim os engenheiros desenvolveram procedimentos para *sintetizar* (simular) eletronicamente uma antena de proporções fisicamente inimagináveis de serem sustentadas em uma plataforma aérea ou orbital, com base no efeito *Doppler*¹⁸. A Figura 2.18 esquematiza o procedimento SAR acima mencionado.



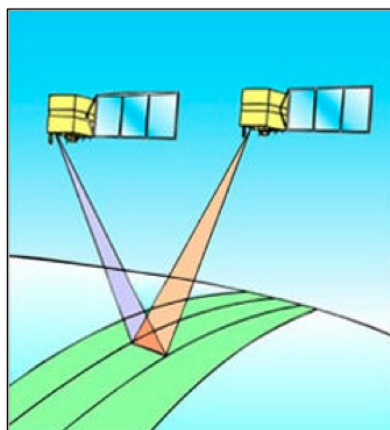
Fonte: modificado de Jensen (2011)

Figura 2.18 – Esquema do procedimento de imageamento SAR. Sintetização baseada no efeito *Doppler* em diferentes momentos de passagem.

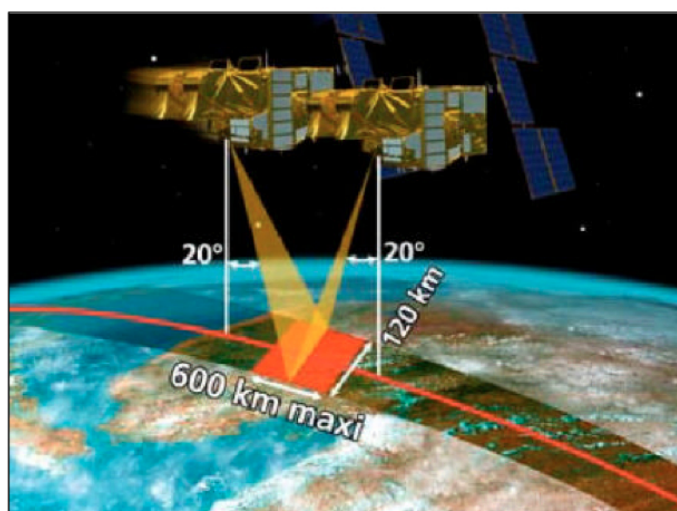
Segundo Barros (2006), em se tratando de SAR existe quatro possibilidades para a obtenção da altimetria: clinometria, estereoscopia, interferometria e polarimetria (Toutin e Gray, 2000). A interferometria – conhecida pelo acrônimo InSAR – necessita, tal como a estereoscopia, de um par de imagens obtidos em diferentes pontos de perspectiva, para o devido processamento, podendo ser obtidas numa passagem única, com a presença de dois receptores posicionados a uma conhecida distância (*baseline*) ou em passagens diferentes, com a possibilidade de mudança no ângulo de visada do sensor/ receptor. Destas

¹⁸ O efeito *Doppler* estabelece que a frequência de um som muda se o ouvinte e/ou a fonte geradora estão em movimento relativo, um em relação ao outro.

estruturas a mais vantajosa é a *baseline* uma vez que adquire o par de imagens numa mesma condição atmosférica (BARROS, 2006). A Figura 2.19 ilustra as duas possíveis estruturas de imageamento interferométrico por radar SAR.



(a)



(b)

Fonte: modificado de Barros (2006)

Figura 2.19 – Diferentes possibilidades de estruturação de imageamento interferométrico por radar SAR. (a) Em passagens diferentes (b) Na mesma passagem.

Segundo definição de Jensen (2011), o imageamento interferométrico por radar SAR é o processo pelo qual as imagens de radar de um mesmo local no terreno são registradas por antenas em (1) diferentes localizações ou (2) tempos diferentes, conforme Figura 2.19. Tal como na análise de um par estéreo, a análise de dois interferogramas possibilita medir com bastante acurácia o deslocamento de qualquer ponto específico na imagem, em x , y e z .

A vantagem deste método é que ele pode operar tanto durante a noite quanto em dias nublados, diferentemente do trabalho com sensores passivos tais como as fotografias aéreas mencionadas. Segundo Jensen (2011), os dados interferométricos SAR podem, muitas vezes, fornecer informações topográficas (x, y, z) que são tão precisas quanto os modelos de elevação digital obtidos pelas técnicas fotogramétricas ópticas tradicionais.

Um bom exemplo de aplicabilidade das técnicas de utilização da interferometria na extração de informações topográficas pode ser mostrado pela missão *Space Shuttle Radar Topography Mission* – SRTM, lançado em 11 de fevereiro de 2000 a bordo do ônibus espacial Endeavour, sendo o pioneiro a usar este tipo de cobertura interferométrica.

A Endeavour era equipada de uma antena banda C e banda X posicionada no final de uma haste de 60m. Esta missão usou um radar de abertura sintética interferométrico, banda C e banda X, para adquirir e compilar dados topográficos em mais de 80% da área emersa da Terra, entre 60°N e 56°S, durante 11 dias de duração da missão (NASA SRTM, 2006). Após o processamento destes dados, os MDE derivados do SRTM de grande parte do planeta foram gerados em resolução espacial de 3 arc-seg (90m), sendo que para o território dos EUA os modelos foram gerados com resolução espacial de 1 arc-seg (30m). Os dados se encontram gratuitamente disponíveis na internet. Trabalhos como de Heipke *et al* (2002) avaliaram a qualidade dos dados levantados pela missão SRTM, podendo chegar em até 6 metros o erro vertical. Assim visto a qualidade apresentada e a disponibilidade facilitada na resolução espacial 90x90 metros, o uso dos MDE derivados do SRTM pode ter grande utilidade para estudos ambientais, principalmente em áreas com baixa ocorrência de dados altimétricos de outras naturezas.

Portanto, a integração entre SIG e as técnicas descritas de sensoriamento remoto pode gerar uma potencial ferramenta possibilitando a comunicação de dados vetoriais e matriciais, provenientes de sensores ativos e passivos, que aperfeiçoam as vantagens inerentes a cada ferramenta. Diversos trabalhos apresentam bons resultados ao usar esta integração, como Sanden *et al* (2000) e Pigeon *et al* (2000).

2.5.4. *Krigagem* utilizando dados SRTM: o exemplo do TOPODATA

Fruto do projeto “Desenvolvimento de aplicações de dados topográficos SRTM” (CNPq, processo n 307530/2008-6 NV) (VALERIANO e ROSSETTI, 2010), tal método proposto por estes autores ficou conhecido como TOPODATA, relativo à escolha de parâmetros geoestatísticos para o refinamento unificado de dados SRTM.

Uma vez estruturados no padrão *raster*, análogo as imagens de satélite, em colunas e linhas, os valores relativos à altimetria podem ser integrados a outras informações ou podem ser utilizados na derivação de outras variáveis topográficas. Assim a proposta TOPODATA consiste na derivação básica de informações topográficas (declividade, orientação de vertentes, curvatura, entre outros) utilizando os dados provenientes do levantamento SRTM, à serem disponibilizadas a comunidade científica para atender as mais variadas finalidades.

Segundo Valeriano (2004 **apud** VALERIANO e ROSSETTI, 2010), os primeiros dados disponibilizados da América do Sul provenientes do levantamento SRTM possuíam fortes restrições quanto ao uso na derivação de informações topográficas complementares. Visto isto, muitos usuários passaram a realizar etapas de pré-processamento e ajuste dos dados SRTM para atender as suas demandas mais específicas, entre elas o refinamento da resolução espacial original de 3 arc-seg (correspondente a 90 metros). Este citado refinamento corresponde a estimativa dos valores de células (altimetria) intermediárias aos dados de entrada original, mediante a utilização de um processo de interpolação previamente determinado pelo usuário.

Relativo ao método proposto de refinamento TOPODATA (VALERIANO e ROSSETTI, 2010) dos dados SRTM, os autores utilizaram o método da *krigagem* para refinar o dado original de 90 metros (3 arc-seg) para a resolução espacial de 30 metros (1 arc-seg). Basicamente, a krigagem e a análise geoestatística aplicada aos dados SRTM teve por objetivo identificar, de forma empírica, as informações geoestatísticas (coeficientes) relativos a variabilidade espacial inerente dos dados de entrada (SRTM 90 metros) e melhor descrever o modelo semi-variográfico a ser utilizado para a interpolação de um MDE derivado na resolução espacial de 30 metros. A Figura 2.20 mostra, como exemplo, tanto o produto original SRTM 90

metros como o MDE proveniente do método TOPODATA (30 metros), para uma mesma área de referência.

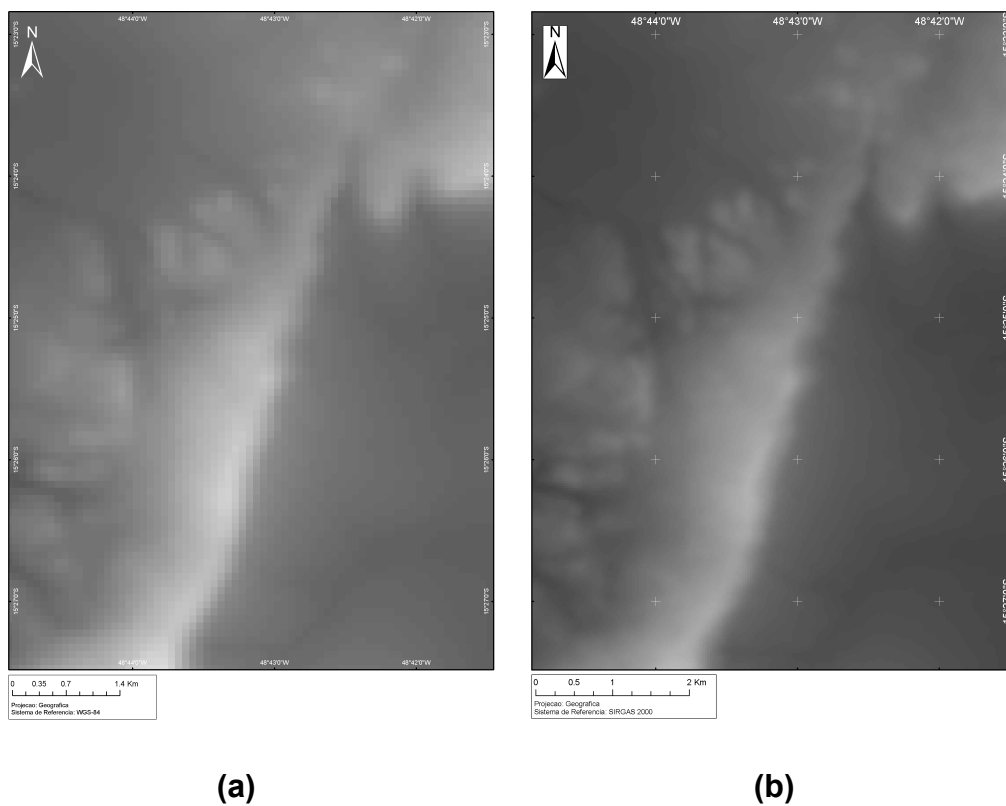


Figura 2.20 – Comparação entre os dados (a) SRTM (90 metros) e (b) TOPODATA (30 metros), para uma mesma área de referência.

CAPÍTULO III

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo escolhida para este projeto de pesquisa constitui do limite político-administrativo do Distrito Federal, localizado no Planalto Central brasileiro, com altitudes que variam de 750 a 1.344 metros. Abrange uma área de aproximadamente 5.800 km², entre os paralelos 15°30'S e 16°03'S; a leste, pelo rio Preto e a oeste, pelo rio Descoberto (Figura 3.1).

Com relação à compartimentação das bacias hidrográficas, a região de estudo se encontra entre as cabeceiras de 3 (três) das principais bacias hidrográficas que banham o território nacional, sendo elas a bacia hidrográfica do Tocantins-Araguaia, a bacia do rio São Francisco e a bacia do Rio Paraná.

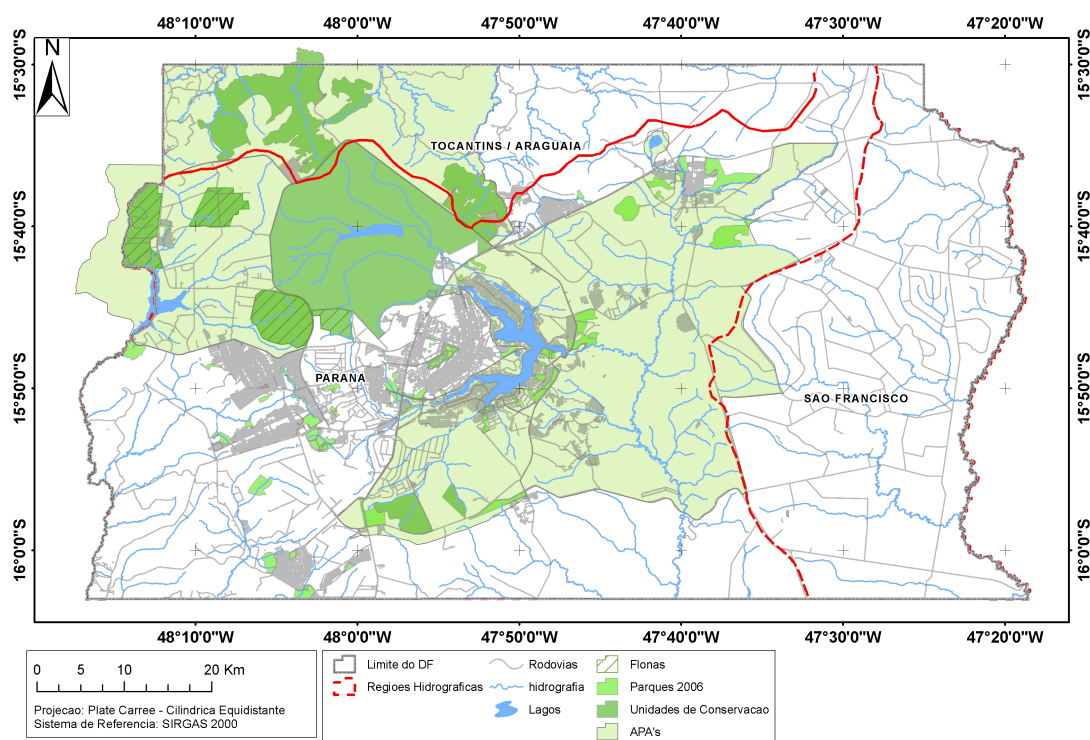


Figura 3.1 - Contexto espacial do Distrito Federal, suas áreas protegidas e as Regiões Hidrográficas

O Distrito Federal é dividido em 30 regiões administrativas - RA's (BRASIL, 2009 Lei Complementar n 803/09), considerando o contexto político-administrativo

deste ente federado. Embora a legislação vigente a respeito de gestão de recursos hídricos enfatize a importância da utilização da unidade territorial prioritária a bacia hidrográfica, muitas destas RA's não coincidem com as tais Unidades Hidrográficas utilizadas pela gestão e estudos de recursos hídricos no âmbito do DF. Sendo assim, é de suma importância a consideração integrada de ambas para a efetiva gestão, visto que as regiões administrativas são fragmentações da atuação do poder público.

A região em destaque apresenta um histórico de ocupação caracterizado pela retirada de vegetação nativa, a intensidade e a forma desordenada do uso do solo e dos recursos naturais que propicia a degradação do meio ambiente como um todo (GONÇALVES, 2007).

Contudo, vale ressaltar que o Distrito Federal foi escolhido como área de estudo uma vez que contém os dados necessários e disponíveis para os testes que serão aqui executados.

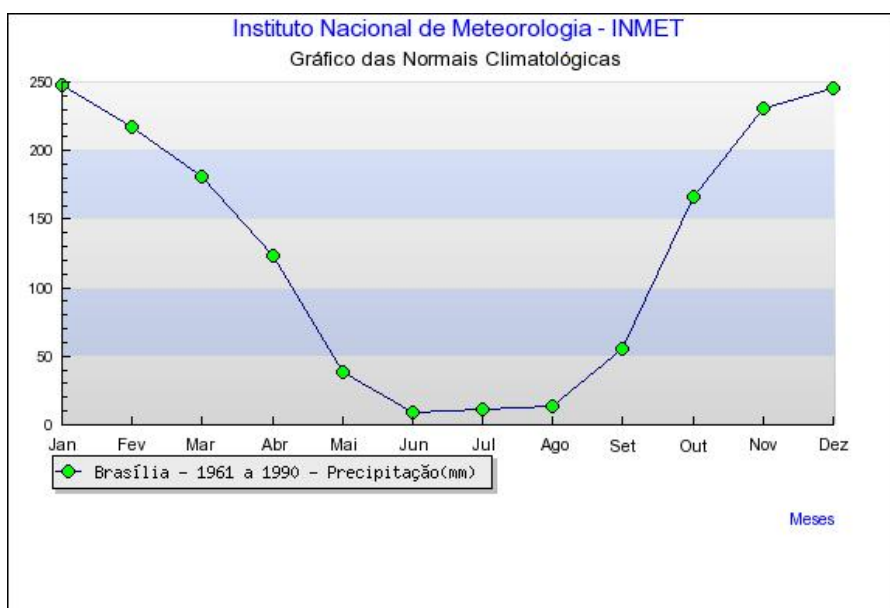
Este capítulo tem o objetivo de apresentar as principais características do meio físico do Distrito Federal como uma síntese dos fatores que controlam a dinâmica existente dentro das bacias hidrográficas. Serão apresentados dados secundários relativos ao clima, a vegetação, ao solo, a geomorfologia e a geologia.

3.2. CLIMA

De acordo com Koppen (s.n. **apud** GONÇALVES, 2007), a região do Distrito Federal pode apresentar os seguintes climas, a depender da variação da temperatura média e de altitude: Tropical Aw, Tropical de Altitude Cwa e Tropical de altitude Cwb.

O Distrito Federal é marcado por forte sazonalidade climática, apresentando uma estação chuvosa e quente, entre os meses de outubro a abril, e uma estação seca, de maio a setembro. A média pluviométrica anual da região varia entre 1.200 a 1.800 mm, onde o mês de janeiro apresenta o maior índice pluviométrico médio (320 mm/mês), e por sua vez, os meses de junho, julho e agosto apresentam os menores índices pluviométricos médios (50 mm/mês) (GONÇALVES, 2007). A Figura 3.2 mostra a distribuição das normais climatológicas, entre o período de 1961 a 1990, no contexto espacial do Distrito Federal, bem como a tabela com os valores trimestrais

de precipitação acumulada (mm), entre 1961 a 2010, relativo aos dados registrados na estação metereológica de Brasília/INMET.



(a)

Trimestre	Precipitação Acumulada no Período (mm)*		
	Limite Inferior da Faixa Normal	Média	Limite Superior da Faixa Normal
jan-fev-mar	533	631	691
fev-mar-abr	457	540	594
mar-abr-mai	313	366	434
abr-mai-jun	132	172	194
mai-jun-jul	32	48	54
jun-jul-ago	11	31	34
jul-ago-set	45	71	91
ago-set-out	158	228	265
set-out-nov	363	445	485
out-nov-dez	551	643	673
nov-dez-jan	628	699	751
dez-jan-fev	602	673	712

(b)

Fonte: Modificado de Instituto Nacional de Meteorologia – INMET/ *Dados de 1961 a 2010.

Figura 3.2 – (a) Distribuição das normais climatológicas da precipitação (mm), entre o período de 1961 a 1990, no Distrito Federal. **(b)** Tabela com valores trimestrais relativos a precipitação acumulada registrados na estação Brasília/INMET.

Com relação à temperatura, o Distrito Federal apresenta a média mensal variando entre 13°C a 22°C, sendo os meses de setembro e outubro os mais quentes, marcados por valores entre 20°C a 22°C; e o considerado mais frio, o mês

de junho, que pode ter valores medidos entre 16°C a 18°C. Tratando da umidade relativa do ar, nos meses de agosto e setembro (estação seca) os valores medidos podem registrar 11%, enquanto na estação chuvosa, pode ser registrado valores máximos de 75%.

3.3. VEGETAÇÃO

Segundo Sema (1998 **apud** CARVALHO *et al*, 2006), a vegetação presente no Distrito Federal esta inserida nos domínios da província fitogeográfica dos Cerrados. Nesta são abrangidos dois grupos distintos, os campos (limpo e sujo) e cerrados (campo-cerrado, cerrado e cerradão), bem como formações adicionais de matas ciliares, mesófilas e veredas (GONÇALVES, 2007).

A formação “Campo Limpo” é caracterizada pela grande quantidade de gramíneas e outras ervas que raramente chegam a um metro de altura. Geralmente este tipo de formação vegetal característico do Cerrado pode ser encontrado em locais com solos arenosos e rasos, com grande deficiência de água nos períodos secos. São característicos de chapadas arenosas, encostas e topo de morros. A Figura 3.3 traz em fotografia um exemplo deste tipo de formação vegetal.



Fonte: Gonçalves, 2007

Figura 3.3 – Representação típica de Campo Limpo com presença de gramíneas e pouca presença de arbustos maiores que um metro.

Por sua vez, os “Campos Sujos”, com formação florística semelhante a do cerrado típico e do cerrado ralo, possui uma presença mais acentuada de arbustos em sua composição do que comparado ao “Campo Limpo”. Mesmo com uma

presença mais expressiva de árvores e arbustos, sua porcentagem na representação desta formação ainda é mínima (cerca de 15%), com solo recoberto por gramíneas que podem ultrapassar um metro. Os arbustos e árvores aqui presentes possuem caules relativamente finos, sendo muito comumente encontrados em “ilhas” de vegetação, forma de agrupamento de material vegetal lenhoso (GONÇALVES, 2007). Um exemplo pode ser citado nos conhecidos campos de murundus.

O Cerrado típico, formação encontrada com maior frequência na região do Distrito Federal e também conhecido como Cerrado *Sensu Strictu*, é caracterizado por árvores de maior porte e com certo espaçamento entre os indivíduos, possuindo uma formação lenhosa que se destaca da camada rasteira. A Figura 3.4 mostra, em fotografia, um exemplo típico desta formação em questão.



Fonte: Gonçalves, 2007

Figura 3.4 – Composição florística típica de cerrado *Sensu Strictu*.

O Cerrado ralo ou Campo Cerrado tem em sua estruturação uma composição florística semelhante ao do Cerrado típico, porém com indivíduos de menor porte. É uma formação intermediária entre o Cerrado típico e o Campo Sujo.

Além das paisagens acima descritas, a fitofisionomia do Cerrado apresenta formações adicionais tais como as matas galeria. Este tipo específico e próprio de formação de vegetação, segundo muitos autores também conhecido como Mata Ciliar, tem como objetivo mais expressivo a proteção dos rios, córregos e outros cursos d'água. Possui uma composição mais expressiva com indivíduos de médio a

grande porte, que mantém a umidade e também servem de corredor de passagem para a fauna local. A Figura 3.5 apresenta um exemplo típico de mata galeria.



Fonte: Gonçalves, 2007

Figura 3.5 – Exemplo de mata galeria localizada em vale encaixado, associada a maior disponibilidade hídrica do curso d água.

Outra formação específica que ocorre no Cerrado é a conhecida “mata mesófila”, que segundo Gonçalves (2007), é a formação vegetal desenvolvida em tipos especiais de solos ligados a interflúvios, muitas vezes confundidas com as matas ciliares. Podem ser de dois tipos: as matas mesofíticas Sempre Verde ou SubCaducifolia/Caducifolia. A Figura 3.6 traz um exemplo típico deste tipo peculiar de formação de vegetação.



Fonte: Gonçalves, 2007

Figura 3.6 – Representação típica de mata mesofítica, com indivíduos de porte médio e caule reto, que se desenvolvem em solos férteis.

As veredas, desenvolvidas em ambientes peculiares com uma elevada saturação de água no solo, são formações de vegetação em ambiente encharcado, com indivíduos resistentes e adaptados a esta situação. São semelhantes a pântanos e podem ocorrer, também, em encostas de morros ou afloramentos rochosos.

Vale ressaltar que as formações acima descritas estão fortemente associadas aos solos no qual se desenvolvem. Este assunto será pautado na próxima seção.

3.4. SOLOS

Os tipos de solos, bem como as nomenclaturas a serem adotada nesta seção do capítulo de contextualização da área de estudo, foram levantadas no documento relativo ao *Mapa Pedológico Digital – SIG Atualizado do Distrito Federal em escala 1:100.000 e uma Síntese do Texto Explicativo*, produzido pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2004), em 2004.

Com base no levantamento pedológico realizado pelo Serviço Nacional de Levantamento de Solos da empresa pública supracitada, serão apresentadas as principais classes de solo que cobrem a região do Distrito Federal, lembrando que o principal agente controlador da formação de solos na região de interesse desta presente pesquisa é o processo pedogenético de laterização (GONÇALVES, 2007).

Segundo Reatto *et al* (2004), os solos classificados e conhecidos como “Latosolos” compõem 54,50% da área total do Distrito Federal. Estes são compostos pelos Latossolos Vermelhos (antiga classe de Latossolo Vermelho-Escuro), representando 38,92% da área, bem como os Latossolos Vermelho-Amarelos, com 15,58%. Estes tipos de solos ocorrem, principalmente, em regiões de topo de chapadas¹⁹, formas de relevo residuais de aplainamento. Normalmente são solos minerais, não hidromórficos, profundos (profundidades maiores que 2 metros) e apresentam um horizonte B muito espesso (>50 cm). Os Latossolos encontrados na região do DF apresentam alta permeabilidade de água, o que justifica a disponibilidade da mesma para o uso na agricultura e abastecimento humano.

¹⁹ Segundo Guerra *et al* (2003), e a denominação usada no Brasil para as grandes superfícies, por vezes horizontais, e a mais de 600 metros de altitude que aparecem na região Centro-Oeste do Brasil. Do ponto de vista geomorfológico a chapada é, na realidade, um planalto sedimentar típico, pois trata-se de um acamamento estratificado que, em certos pontos, esta nas mesmas cotas da superfície de erosão, talhadas em rochas precambrianas.

Geralmente são ácidos (níveis de pH entre 4,0 e 5,5), o que requer correção para atividades de agricultura.

Por sua vez, os Neossolos Quartzarênicos (antigas classes das areias quartzosas) são outros tipos de solos encontrados no DF e representam 0,51% da área de estudo. Geralmente são caracterizados como sendo solos profundos (pelo menos 2 metros) com textura arenosa ou franco-arenosa. São constituídos por quartzo, com máximo de 15% de argila e sequência de horizontes A-C (REATTO *et al.*, 2004). São predominantemente associados às formações vegetais do Cerrado e/ou Campo Cerrado.

Os Neossolos Quartzarênicos são ricos em minerais primários ou matéria orgânica, e na região do DF ocorrem principalmente em condições de topografia acidentada (GONÇALVES, 2007). Porém, outra característica importante é que estes solos são associados a sedimentos arenosos resultantes das alterações de rochas quartzíticas e areníticas, e podem ocorrer também em relevos planos ou levemente ondulados (REATTO *et al.*, 2004). São solos altamente susceptíveis a erosão, e quando ocorrem em cabeceiras de drenagem e adjacentes a cursos d'água devem ser destinados a preservação.

Outro solo presente no contexto do Distrito Federal é a classe referente aos Argilossolos (antiga classe do Podzólico Vermelho-Escuro), que são subdivididos em Argilossolos Vermelhos, correspondente a 2,09% da área de estudo; e, os Argilossolos Vermelho-Amarelos, correspondente a 0,8% da respectiva área de estudo.

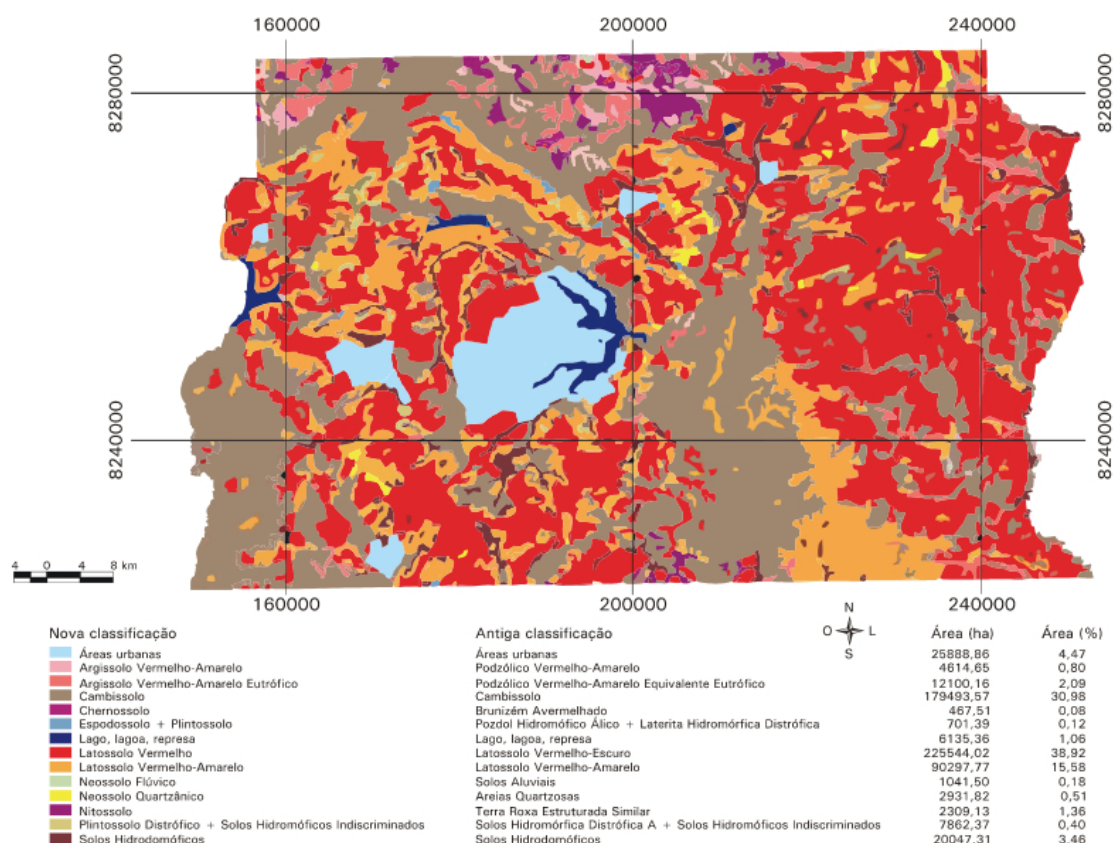
Os Argilossolos estão presentes na paisagem, principalmente, na porção inferior das encostas, nas partes côncavas onde o relevo apresenta-se ondulado (8% - 20% de declive), ou fortemente-ondulado (20 – 45% de declive) (REATTO *et al.*, 2004).

Outro tipo de solo bastante comum incidente na área de interesse (30,98%) são os conhecidos cambissolos. São solos que apresentam horizonte subsuperficial submetido a pouco, ou quase nenhuma, alteração física e/ou química, porém suficiente para o desenvolvimento de cor e estrutura (REATTO *et al.*, 2004). Podem ser rasos (0,2 m) ou profundos, atingindo até 1 (um) metro, apresentando coloração

bruno-amarelada no horizonte superficial e vermelha amarelada no subsuperficial, com presença de cascalhos e material concrecionário.

Considerando o uso, estes solos deveriam estar associados a atividades de preservação permanente, uma vez que se encontram em locais íngremes e possuem pouca profundidade. Na recuperação de áreas já degradadas no âmbito do DF, associadas a esta classe de solo, deve ser incentivado o plantio de espécies nativas (reflorestamento), com o intuito de fornecer proteção com a cobertura do solo em relação às ações do intemperismo.

Além das classes apresentadas nesta seção, no contexto do DF podem ser encontradas outras classes de solo, tais como o Chernossolo (0,08%), Plintossolo (0,40%), os Neossolos Flúvicos (0,18%), bem como a classe de solos associada aos solos hidromórficos (3,98%). A Figura 3.7 mostra o mapa de solos do Distrito Federal, na escala 1:100.000, com as devidas indicações das classes.



Fonte: Modificado de Reatto *et al.*, 2004

Figura 3.7 – Mapa de solos do Distrito Federal, na escala 1:100.000, com as indicações das classes acima apresentada. (projeção: UTM 23S estendido a oeste – SICAD)

3.5. GEOMORFOLOGIA

O estudo e compreensão dos aspectos geomorfológicos são importantes e inseparáveis no trato da questão a respeito da delimitação de bacias hidrográficas, de escopo desta pesquisa. Assim esta seção tem o objetivo de descrever a geomorfologia do Distrito Federal para dar subsídio às etapas de análise dos dados a serem gerados.

Segundo Ab' Saber (1964) as características geomorfológicas da paisagem cujo domínio é o Cerrado são resultantes de uma prolongada interação do regime climático tropical semiúmido com fatores litológicos, edáficos e bióticos.

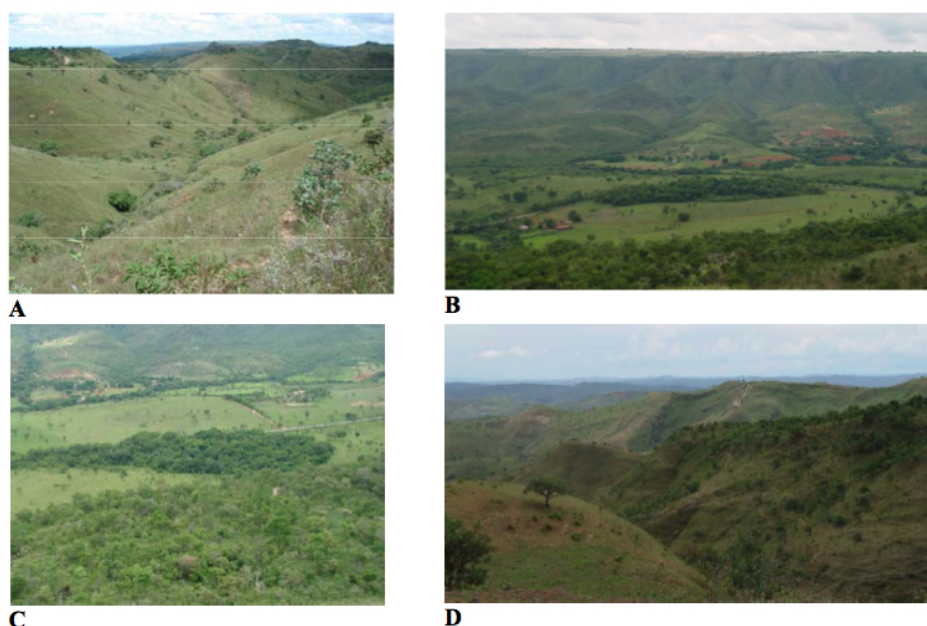
O Distrito Federal está localizado no Planalto Central do Brasil e caracteriza-se pela existência de níveis planos e levemente ondulados (região de chapadas), por porções inclinadas que se estendem da base das chapadas e/ou morros residuais em direção aos vales (pediplanos), e por áreas entalhadas e dissecadas pelo rio Paranoá, São Bartolomeu, Preto, Maranhão e Descoberto (NOVAIS PINTO, 1994 **apud** GONÇALVES, 2007).

As áreas dissecadas de vale, que ocupam cerca de 35% do Distrito Federal, correspondem a uma situação geomorfológica referente a depressões sobre litologias de resistência variada, apresentando acentuados declives (GONÇALVES, 2007). Estas regiões são ocupadas pelos principais rios do DF, tal como a bacia do rio Maranhão e a bacia do rio São Bartolomeu. Exemplo desta formação geomorfológica pode ser visto na Figura 3.8 a.

As regiões de chapadas ocupam cerca de 35% da área do Distrito Federal, local que é possível encontrar altimetrias maiores do que 1.000 metros, caracterizados por topografia plana ou levemente ondulada. Um exemplo no contexto do DF é a conhecida chapada da Contagem (Figura 3.8 b).

Outra situação geomorfológica observada no DF são as áreas dissecadas intermediárias, ocupando cerca de 31% da área. Estas são caracterizadas por regiões fracamente dissecadas, drenadas por pequenos córregos, modeladas sobre ardósias, quartzitos e metarritmitos do Grupo Paranoá, com a predominância dos latossolos (GONÇALVES, 2007). Exemplo desta formação geomorfológica pode ser visto na Figura 3.8 c.

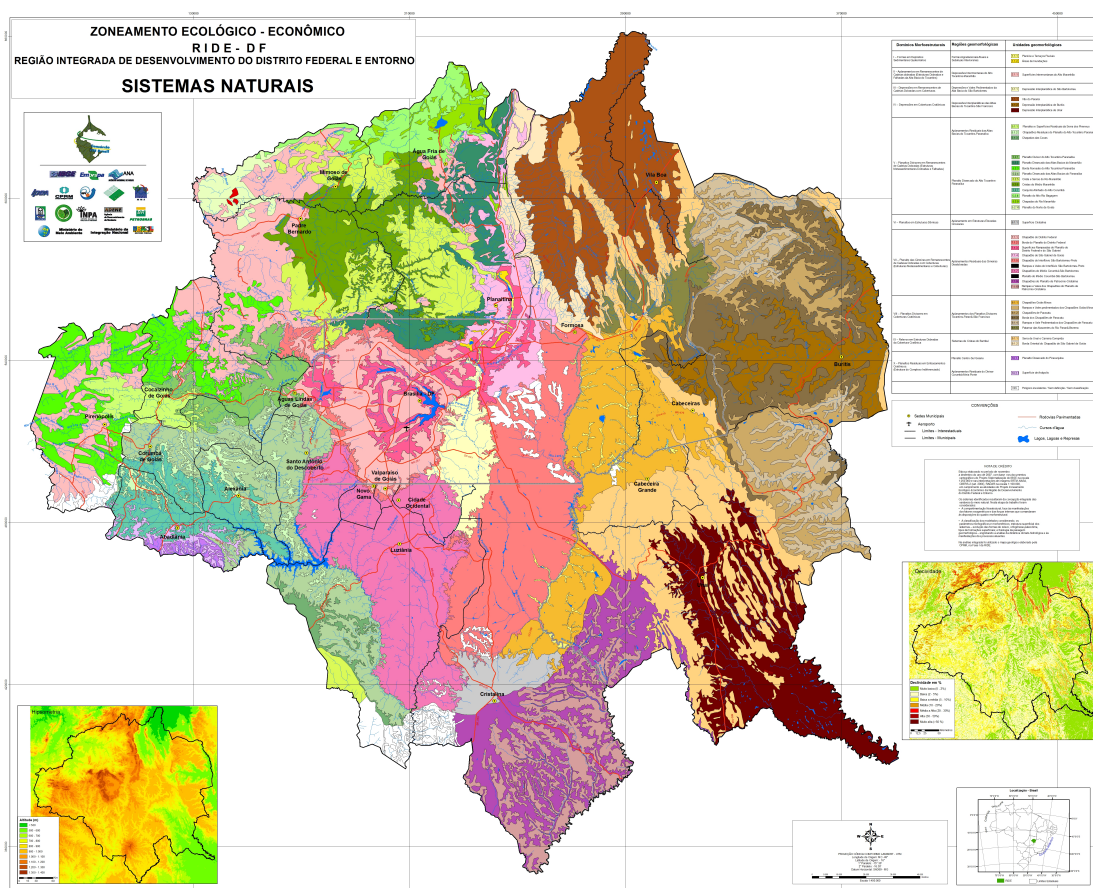
Segundo Martins & Baptista (1998), além destas três situações apresentadas existem, em regiões mais restritas, as faixas de transição entre relevos de chapada e região de dissecação intermediária, conhecidos como Escarpas ou Rebordos. As Escarpas correspondem à transição entre região de chapada e região de dissecação de vale, e os Rebordos, por sua vez, a transição entre região de chapada e região de dissecação intermediária (Figura 3.8 d).



Fonte: Modificado de Gonçalves, 2007

Figura 3.8 – A) Região de dissecação de vales; **B)** Exemplo de borda de chapada e região de vales dissecados, apresentando escarpa na zona de transição; **C)** Configuração típica de região de dissecação intermediária; **D)** Rebordo de transição entre área de dissecação intermediária e área de chapada.

Cada um destes compartimentos geomorfológicos acima apresentados irá desenvolver um padrão próprio de drenagem, e por sua vez, influenciará de maneira direta na morfometria das bacias hidrográficas. A Figura 3.9 apresenta a compartimentação geomorfológica, no contexto da Região Integrada de Desenvolvimento do Distrito Federal e Entorno – RIDE/DF, utilizado na etapa de diagnóstico do Zoneamento Ecológico-Econômico – ZEE.



(a)

(b)

CAPÍTULO IV

MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento da metodologia, foi escolhida, inicialmente, a bacia hidrográfica do Lago Paranoá com o intuito de testar os métodos propostos em um MDE.

Os produtos cartográficos foram avaliados de acordo com o Padrão de Exatidão Cartográfico (PEC) estabelecido pela Comissão Nacional de Cartografia (CONCAR) através das Normas Técnicas da Cartografia Nacional, descritas no Decreto 89.817, de 20 de junho de 1984. A Figura 4.1 mostra o roteiro metodológico adotado nesse capítulo, com a apresentação das classes referentes aos dados de entrada, processos metodológicos, insumos/parametrizações e resultados.

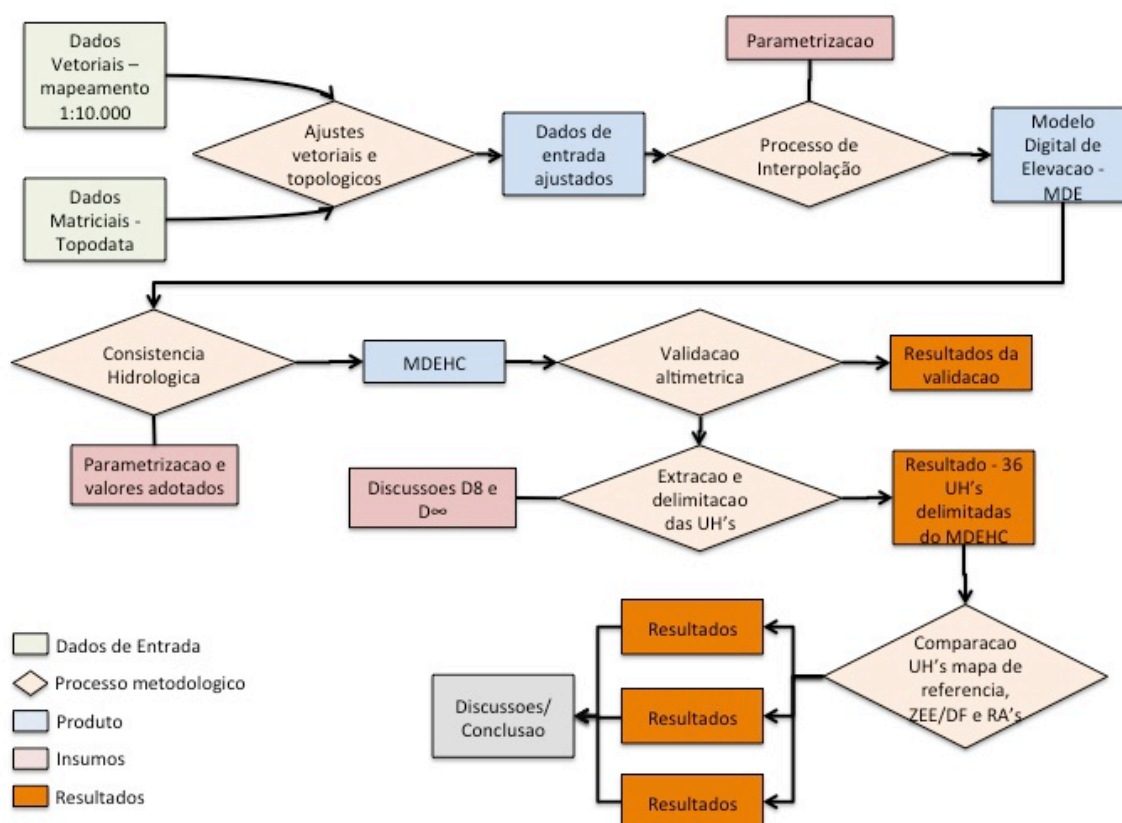


Figura 4.1 – Roteiro metodológico simplificado.

4.1. PRÉ-PROCESSAMENTO DOS MATERIAIS DE ENTRADA UTILIZADOS

Essa é uma importante etapa precedente à elaboração do MDE, composta da correção e verificação dos dados vetoriais de entrada na modelagem, uma vez que a maioria dos interpoladores necessita de dados digitais de entrada consistidos topologicamente (CHAVES, 2002).

4.1.1. Pré-processamento dos dados vetoriais utilizados

Os dados de entrada vetoriais utilizados nas etapas metodológicas propostas foram provenientes do novo mapeamento do Distrito Federal elaborado pela Agência de Desenvolvimento do Distrito Federal – Terracap. Este levantamento cartográfico utilizou-se de técnicas de aerolevanteamento nas suas etapas de elaboração, sendo composto por 244 folhas articuladas no Sistema Cartográfico do Distrito Federal (SICAD) 1:10.000. Este produto vetorial encontra-se referenciado no sistema geodésico SIRGAS 2000.

O SICAD foi criado em 1976, por meio do decreto distrital nº 4.008/07, e é referência obrigatória para todo e qualquer trabalho de topografia, cartografia, demarcação, estudos de engenharia e de urbanismo no DF (BRASIL, 1977). Caracteriza-se pela representação cartográfica do DF no fuso UTM 23S expandido a oeste, cujo referencial geodésico, até o ano de 2010, era o Astro Datum Chuá.

Segundo Terracap (2010), este mapeamento passou por rigoroso controle de qualidade em cada etapa do processo de elaboração dos produtos inerentes ao aerolevanteamento (cobertura aerofotogramétrica, aerotriangulação, apoio de campo, edição das ortofotocartas e posterior edição em ambiente SIG). A seguir estão listadas algumas das características técnicas deste levantamento.

- Cobertura aerofotogramétrica realizada em 2010 composto por 2.276 fotos na resolução espacial de 25 cm, sendo que o produto disponibilizado e acessado para esta pesquisa foi degradado para 1 metro. As imagens eram compostas por 4 (quatro) bandas; 3 no espectro do visível (RGB) e 1 (uma) na faixa do infravermelho próximo.
- Recobrimento longitudinal de 60% e lateral de 30%.

- Voo apoiado composto por 40 pontos pré-sinalizados (GCP's), referente a receptores GNSS geodésicos de dupla frequência L1/L2, diminuindo o total de apoio de campo a partir de pontos obtidos por aerotriangulação.
- 80 marcos de apoio básico.
- Os dados vetoriais, estruturados em ambiente SIG, são compostos por 17 planos de informação (uso e ocupação do solo, hidrografia, sistema viário, entre outros).

Segundo Terracap (2010) os produtos elaborados, sejam vetoriais ou raster, encontram-se no “Padrão de Exatidão Cartográfica - PEC” classe “A” de acordo com o decreto 89.817/83, e no sistema de referência SIRGAS 2000. Estas cartas, na escala 1:10.000, que contém planos de informação vetorial (hidrografia, curvas de nível, pontos cotados, entre outros), bem como a ortofoto utilizada no processo de levantamento cartográfico referente a cada articulação. Os produtos encontram-se em conformidade com o ambiente SIG.

Os vetores utilizados especificamente para atender as demandas das etapas metodológicas subsequentes foram: as curvas de nível 1:10.000 com equidistância de 5 metros, variando de 730 metros a 1340 metros; os pontos cotados, num total de 42.353 pontos aerotriangulados; e, a rede hidrográfica 1:10.000 compatível com os vetores altimétricos utilizados. A Figura 4.2 mostra um exemplo de ortofoto com sobreposição dos dados vetoriais (curvas de nível, pontos cotados e hidrografia).

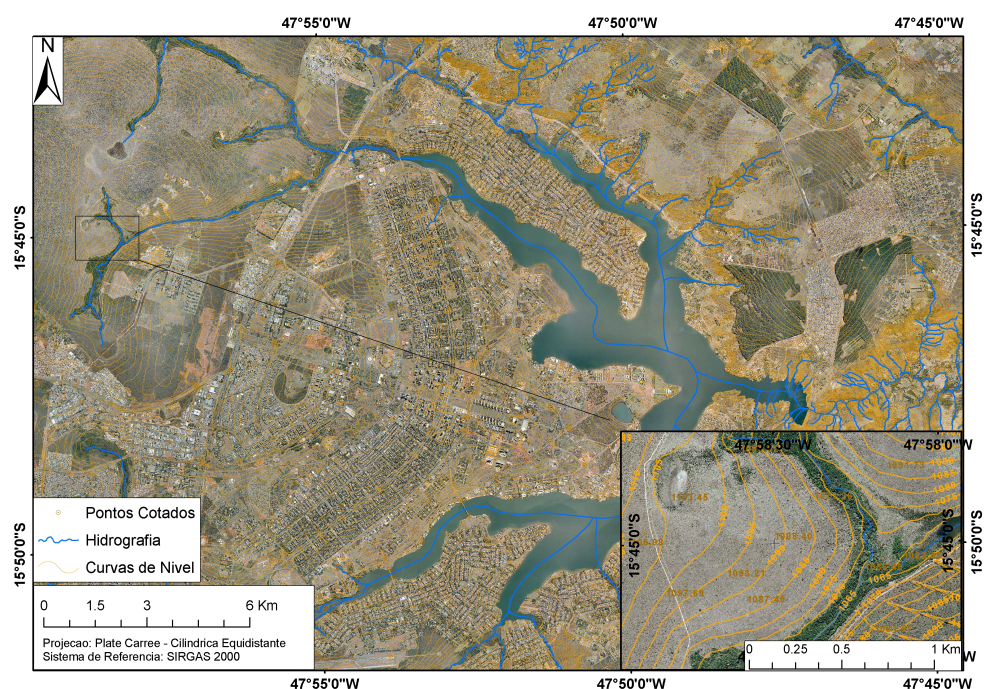


Figura 4.2 – Representação de um conjunto de ortofotos proveniente do aerolevantamento mencionado e os dados de entrada vetorial, na escala 1:10.000, curvas de nível, pontos cotados e hidrografia.

Vale ressaltar que dos iniciais 42.353 pontos cotados, um total de 276 pontos foram retirados da etapa posterior de interpolação com o intuito de viabilizar a validação altimétrica do modelo gerado, segundo as normas técnicas do decreto supramencionado. Além destes, alguns outros pontos identificados com valores “espúrios” foram excluídos com o objetivo de minimizar a geração de depressões, inerentes ao método de interpolação. A Figura 4.3 mostra a disposição espacial dos pontos cotados escolhidos para a etapa de validação, bem como os que foram utilizados como dado de entrada no processo de interpolação.

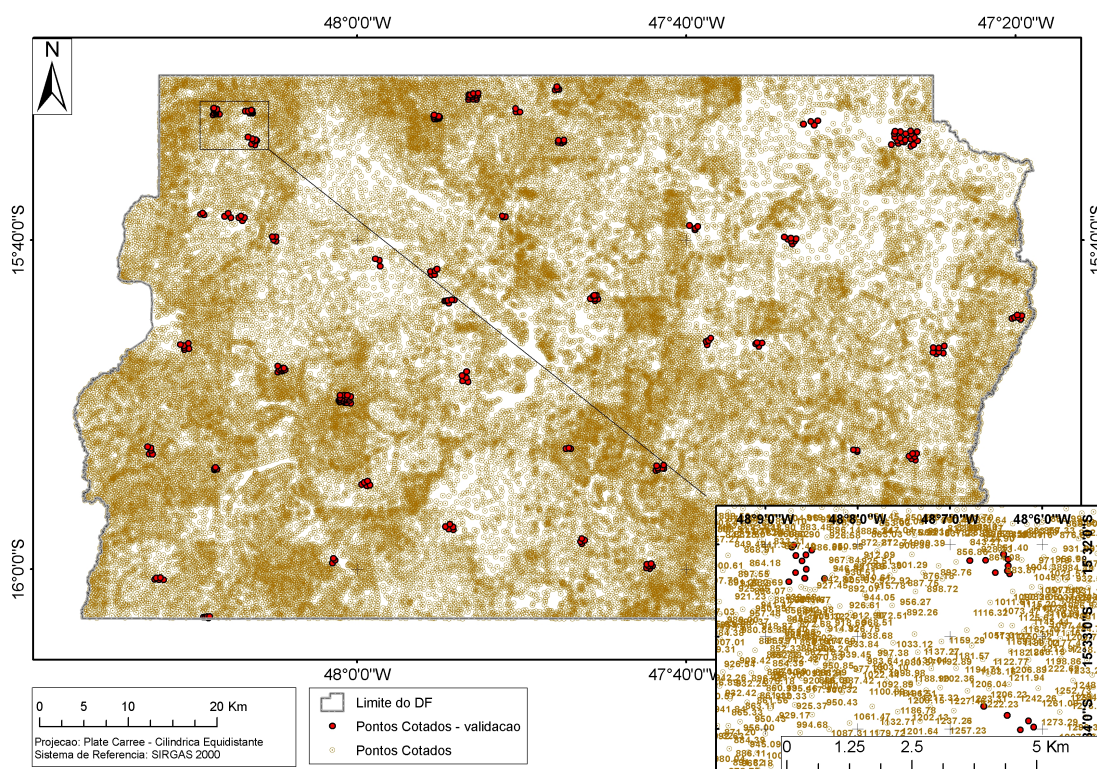


Figura 4.3 – Disposição espacial dos pontos cotados (cor marrom) utilizados na etapa de interpolação, bem como os pontos cotados escolhidos (cor vermelha) para a etapa de validação altimétrica proposta para o MDE.

Com relação à rede vetorial hidrográfica utilizada, na escala nominal 1:10.000, foram realizados pré-processamento de edição e ajuste topológico, etapa necessária e precedente ao método de interpolação adotado. Este dado de entrada em específico passou por verificação segundo sua conectividade e direcionamento dos trechos de curso d'água, sendo que inconsistências foram devidamente identificadas e corrigidas. A Figura 4.4 mostra um exemplo hipotético dos vetores referentes à hidrografia vetorial com a conectividade e direcionamento topológico ajustado.

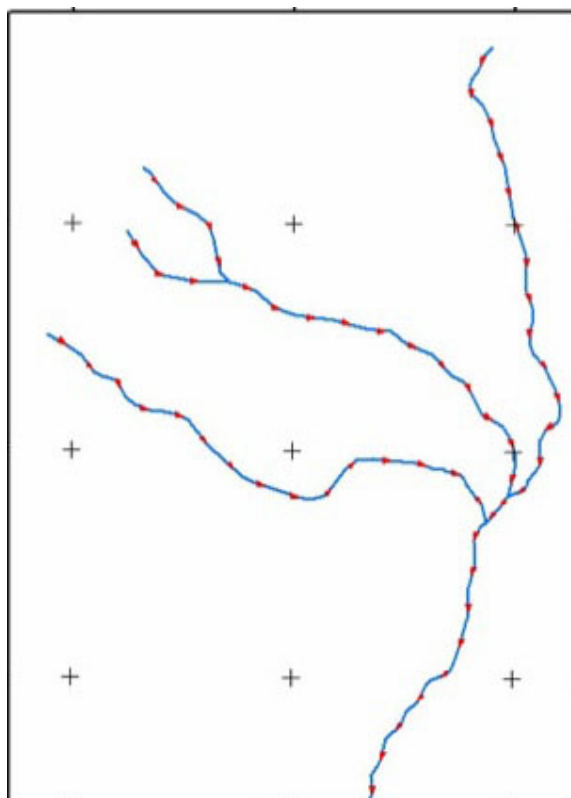


Figura 4.4 – Exemplo hipotético da etapa de correção da malha hidrográfica (cor azul) segundo sua conectividade e direcionamento, primordial para a etapa posterior de interpolação. As setas vermelhas mostram o direcionamento do escoamento vetorial de cada trecho de curso d’água.

Como os dados aqui apresentados não possuíam extensão além do limite político-administrativo do Distrito Federal, foi necessária a utilização de dados altimétricos complementares, o TOPODATA (VALERIANO e ROSSETTI, 2010), com o objetivo de garantir a continuidade do traçado das almejadas Unidades Hidrográficas – UH’s. Segundo Miceli *et al.* (2010), o modelo altimétrico TOPODATA pode alcançar a precisão compatível até a classe B para a escala de 1:50.000, segundo as normas cartográficas.

Desta forma, para garantir a contiguidade no traçado do relevo, foi utilizado uma faixa empírica de *buffer* de 8 km com relação ao limite político-administrativo do Distrito Federal utilizando os dados provenientes do TOPODATA. Outro ponto importante a ser colocado nesta etapa foi a elaboração de uma zona de intersecção, relativa a 1 km (Figura 4.5), entre os dados provenientes do aerolevanteamento 1:10.000 e os relacionados ao produto TOPODATA. O intuito desta zona de sobreposição entre os dados de entrada aqui considerados é para evitar a passagem “abrupta” de um dado altimétrico, de natureza metodológica diferente,

para o outro, e assim, evitar possíveis rupturas de terreno (Figura 4.6) (“efeito de degrau”) na etapa de interpolação. A Figura 4.7 mostra, como exemplo, os centróides selecionados com as informações altimétricas do TOPODATA da região de interesse.

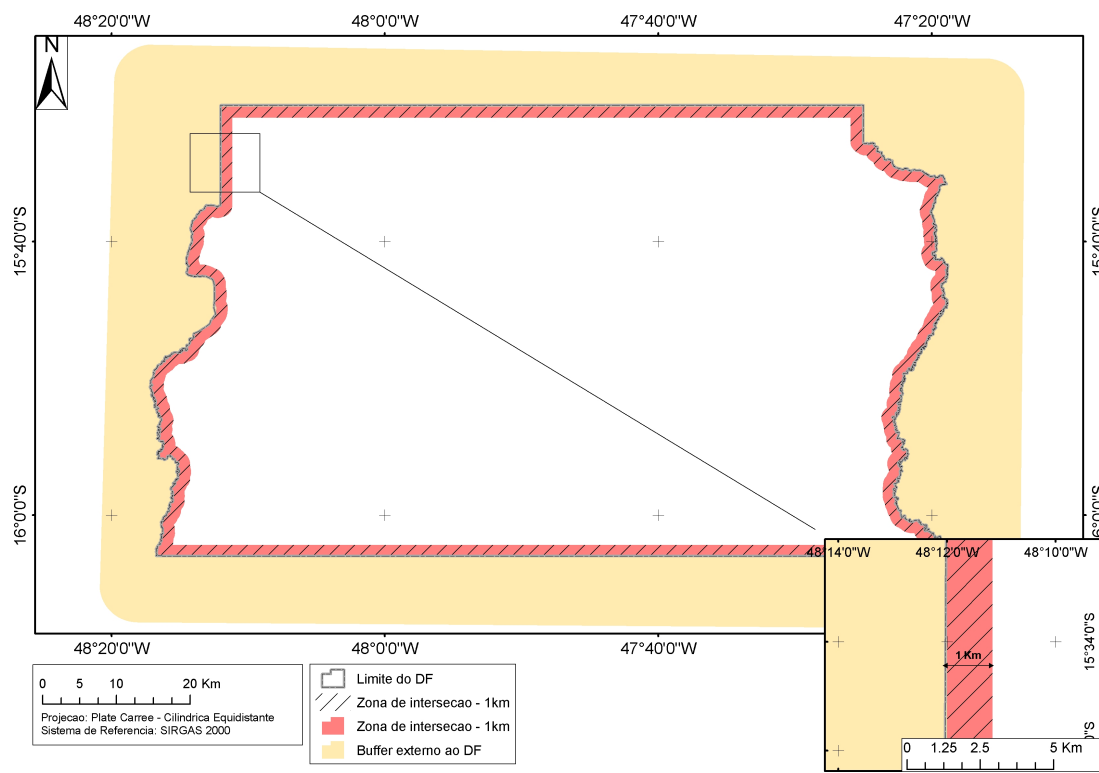


Figura 4.5 – Mostra o *buffer* (8Km) utilizado para a seleção das informações altimétricas provenientes do refinamento TOPODATA, bem como a zona de sobreposição (1 km) entre os dados de entrada nesta etapa metodológica.

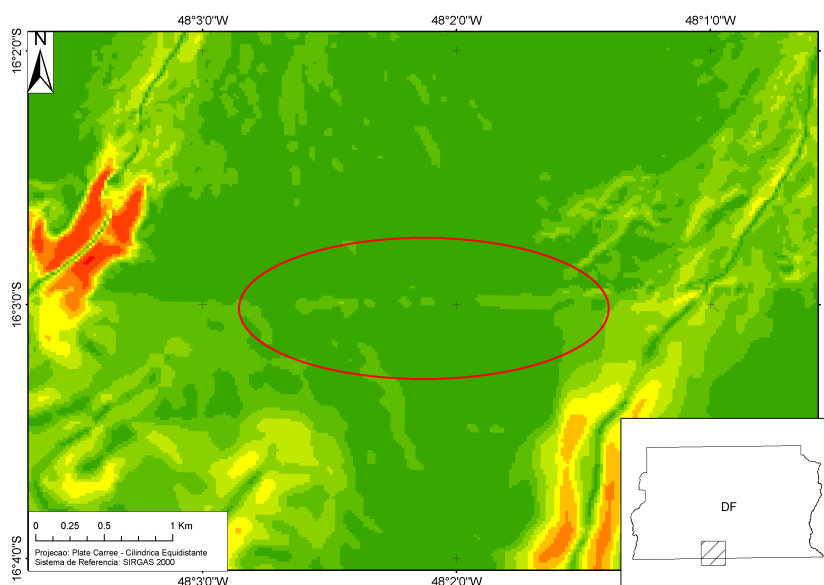


Figura 4.6 – Efeito de “ruptura” do relevo devido à passagem “abrupta” de um dado altimétrico para outro com diferença metodológica no levantamento. O círculo em vermelho exemplifica o efeito o qual se deseja evitar.

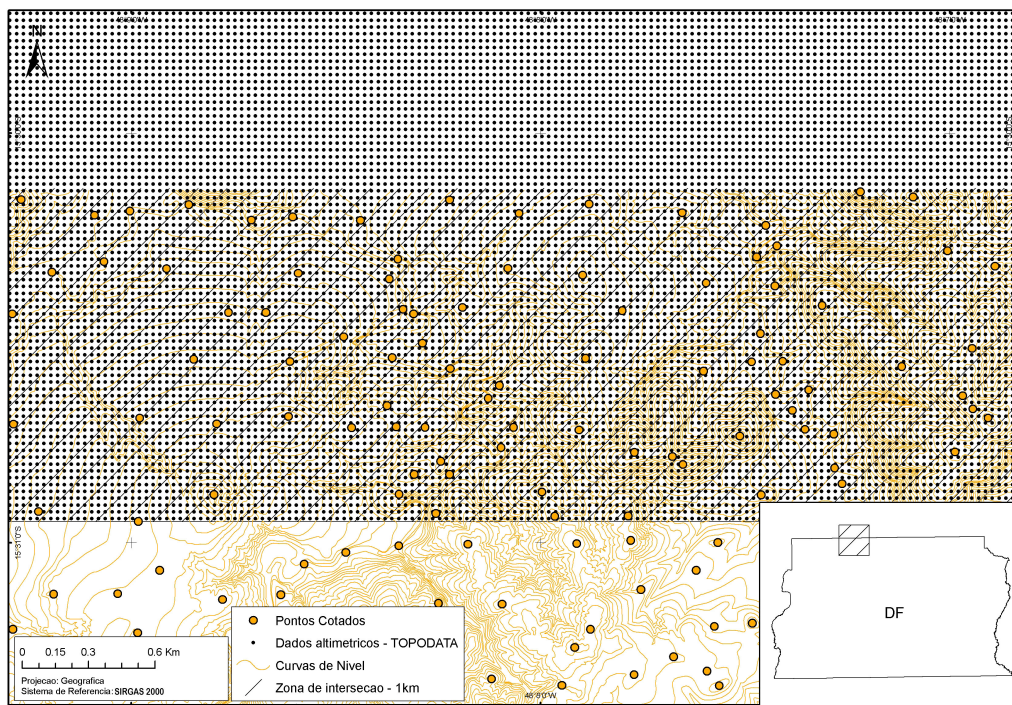


Figura 4.7 – Mostra os centróides das células do produto TOPODATA com informações altimétricas relevantes (pontos na cor preta), bem como a estimada área de interseção entre os dados provenientes do TOPODATA e do aerolevantamento fotogramétrico.

Uma vez organizados os dados de entrada, sejam os provenientes do aerolevantamento fotogramétrico 1:10.000 ou de dados *raster* TOPODATA, e devidamente corrigidos passa-se para a etapa metodológica subsequente de interpolação e geração do MDE relativo a área de interesse.

4.2. ETAPA DE INTERPOLAÇÃO E GERAÇÃO DO MODELO DIGITAL DE ELEVACÃO (MDE)

O MDE foi elaborado utilizando o módulo TOPOGRID (HUTCHINSON, 1989), do software ArcGIS 9.3.1. Esse método de interpolação foi escolhido, entre muitos outros existentes, por possibilitar a utilização do vetor da rede hidrográfica no processo de interpolação.

O valor adotado para o tamanho da célula da matriz a ser interpolada (resolução espacial) foi de 20 metros, compatível com o padrão planimétrico classe

“A” presente nas Normas Técnicas da Cartografia Nacional – Decreto 89.817/84, para a escala de referência 1:100.000.

Mesmo com a possibilidade da geração de um MDE com resolução espacial mais acurada, devido à utilização de dados de entrada referente ao aerolevantamento fotogramétrico 1:10.000, os mesmos foram degradados segundo as normas técnicas para a compatibilização com a escala de trabalho 1:100.000, cujo objetivo visa a posterior comparação com o mapa de referência *Mapa das Unidades Hidrográficas do Distrito Federal*, que se encontra na citada escala.

O capítulo II referente à discussão teórico-conceitual a respeito do processo de interpolação, especialmente com relação ao algoritmo TOPOGRID, elencou uma série de parâmetros a serem definidos pelo usuário com o intuito de melhor representar a variação altimétrica do relevo no produto interpolado esperado. Assim, neste ponto da pesquisa foram elaborados oito testes, de caráter empírico, nos quais foram geradas várias interpolações de uma área-teste comum com o intuito de selecionar a parametrização mais coerente a ser utilizada na modelagem altimétrica, atendendo, portanto, os objetivos esperados.

Um dos efeitos indesejados e inerentes ao algoritmo TOPOGRID é o conhecido “efeito escada”, que é uma distorção na etapa de interpolação na qual são observados “picos” com altimetria mais elevada do que as células vizinhas relativo às áreas das amostragens lineares (curvas de nível), dando o efeito visual de “escadas” no MDE elaborado. A Figura 4.8 mostra o citado “efeito escada” inerente ao método de interpolação TOPOGRID.

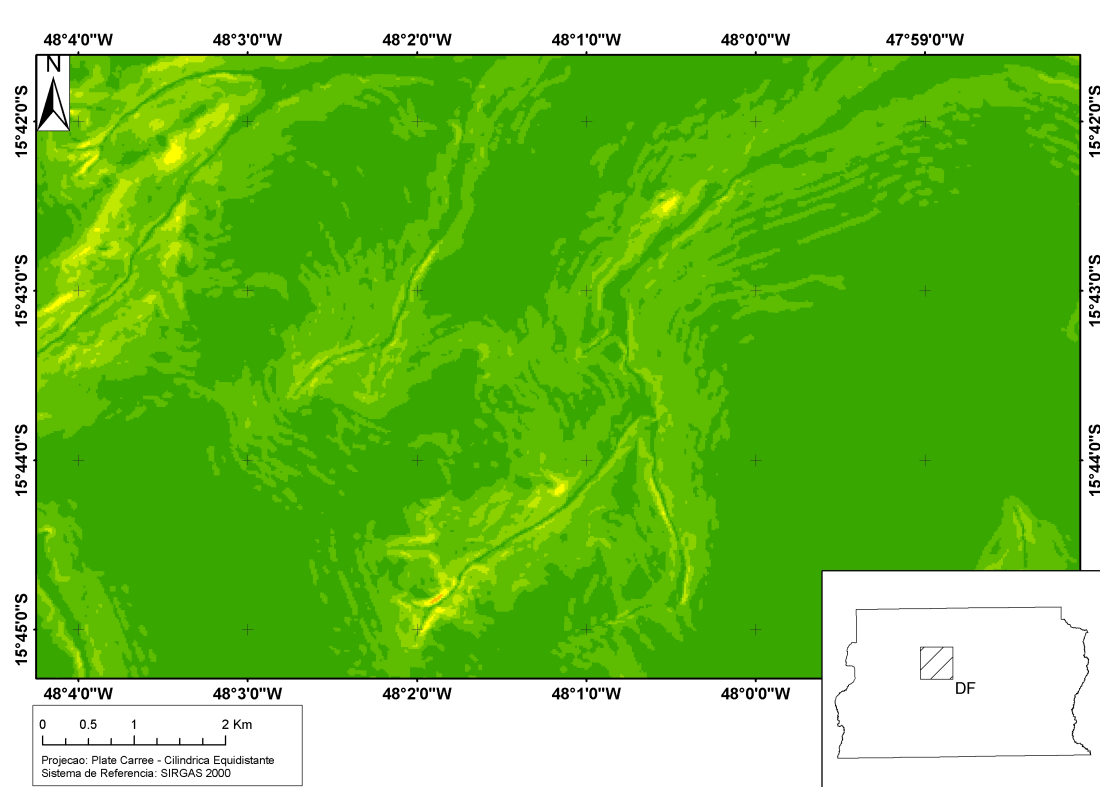


Figura 4.8 – Exemplo do “efeito escada” após o processo de interpolação utilizando o algoritmo TOPOGRID.

A Figura 4.9 traz a área-teste utilizada nesta análise empírica de identificação da parametrização a ser utilizada na etapa de interpolação.

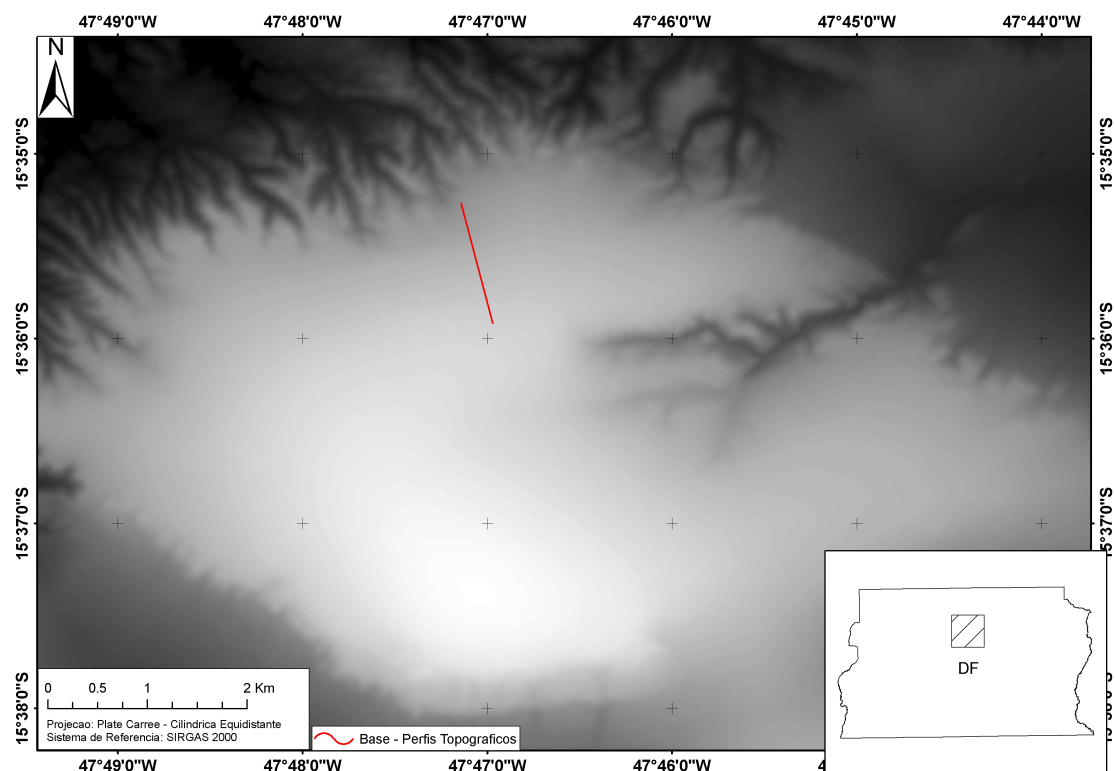


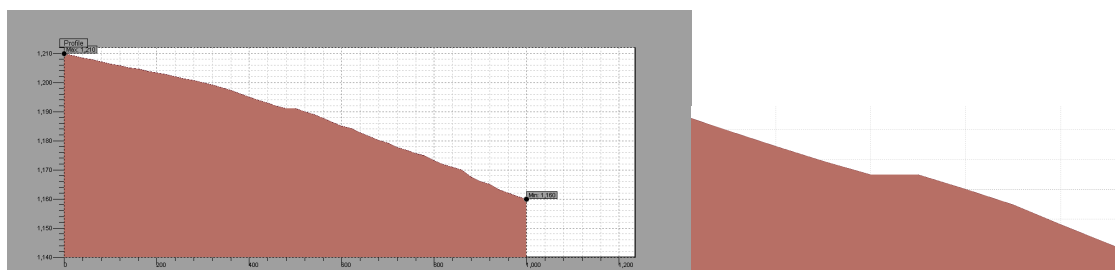
Figura 4.9 – Área-teste selecionada na porção norte do DF, bem como a base (feição linear representado na cor vermelha) para a estimativa dos perfis topográficos dos oito diferentes MDE's elaborados.

Pode-se observar na Figura 4.8 que foi feita uma linha de perfil topográfico (representados em cor vermelha) para ser utilizada como base comparativa entre os oito MDE's elaborados referentes à área teste, utilizando o algoritmo TOPOGRID. A Tabela 4.1 mostra os valores dos parâmetros adotados para cada um dos oito MDE's elaborados.

Tabela 4.1 – Valores adotados na parametrização da interpolação TOPOGRID para cada um dos oito MDE's

MDE	Imposição da Drenagem	Dado primário	Interações	ROUGHNESS PENALTY	DISCRETE ERROR FACTOR	VERTICAL STANDARD ERROR	TOLERANCE 1	TOLERANCE 2	Resolução espacial (metros)	margem externa (pixels)
Topo1	Sim	contorno	40	0	1	0	2,5	100	20	20
Topo2	Sim	contorno	40	0	1	0	4	100	20	20
Topo3	Sim	contorno	40	0	1	0	50	100	20	20
Topo4	Sim	contorno	40	0,5	1	0	2,5	200	20	20
Topo5	Sim	contorno	40	0	2	0	2,5	100	20	20
Topo6	Sim	contorno	40	0	10	0	2,5	100	20	20
Topo7	Sim	contorno	80	0	2	0	2,5	100	20	20
Topo8	Sim	contorno	40	0	5	0	2,5	100	20	20

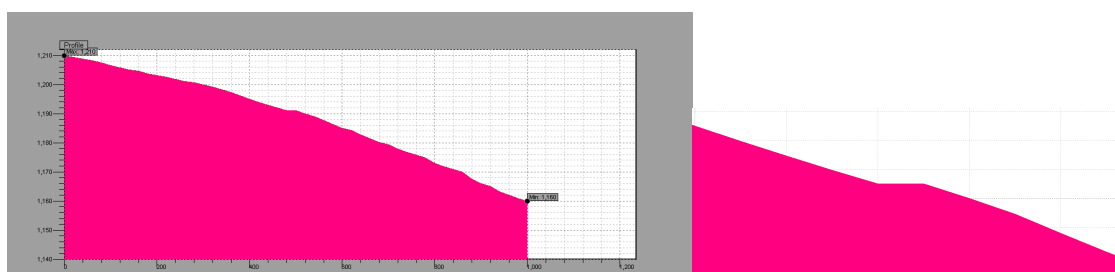
Após a elaboração dos MDE's referentes à área-teste, foram observados os perfis topográficos de cada um deles, sendo comparados entre si em relação à possível suavização do “efeito escada”. A Figura 4.10 traz os respectivos perfis topográficos relativos aos 8 MDE's elaborados, segundo diferentes parametrizações.



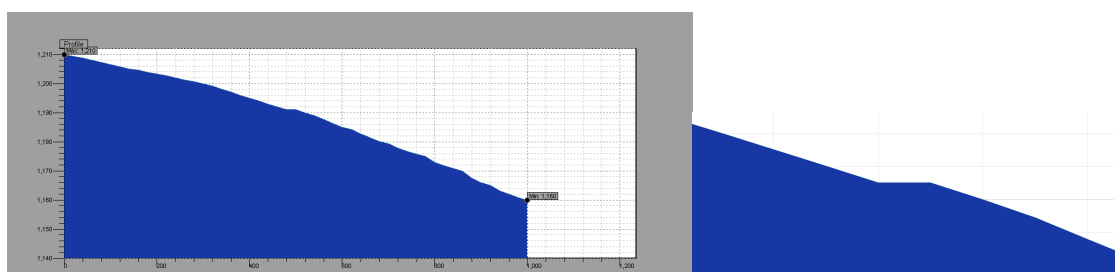
(a)



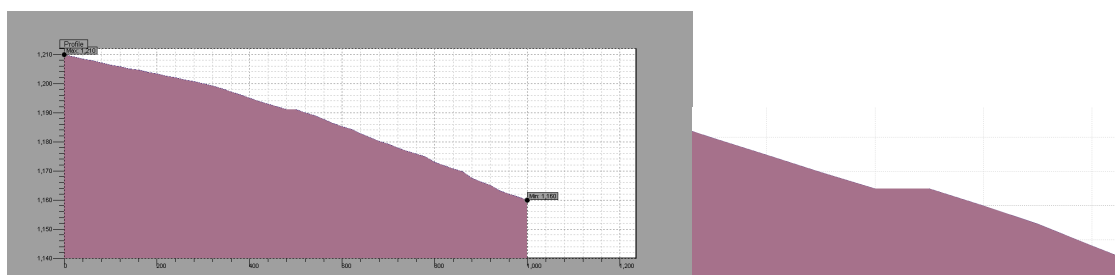
(b)



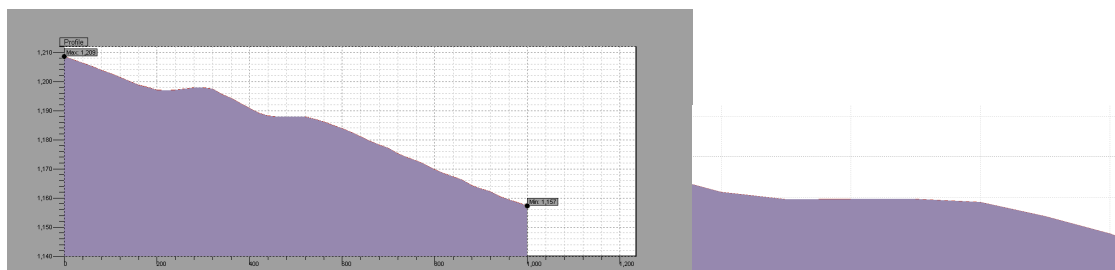
(c)



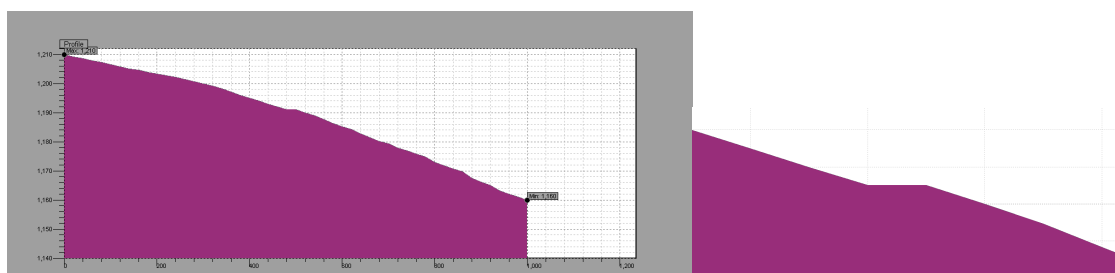
(d)



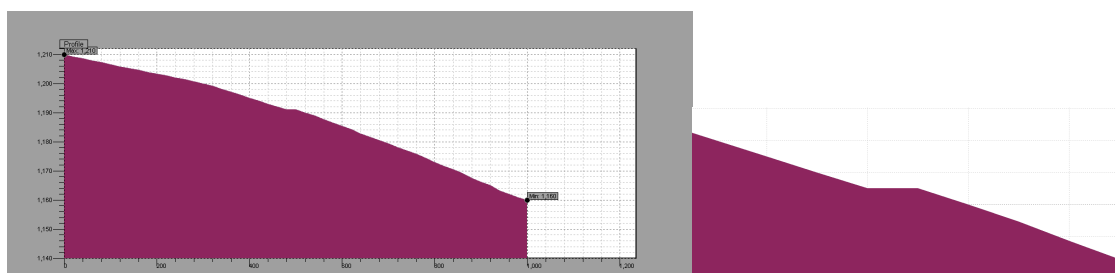
(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 4.10 – Perfis topográficos dos oito MDE's elaborados, conforme diferentes parametrizações, acompanhados de porção com “efeito escada”. **(a)** Topo1; **(b)** Topo2; **(c)** Topo3; **(d)** Topo4; **(e)** Topo5; **(f)** Topo6; **(g)** Topo7; **(h)** Topo8.

Com o intuito de selecionar o melhor conjunto de valores para a parametrização da modelagem altimétrica, considerando a suavização do “efeito escada”, pode-se observar que a adoção de diferentes valores não ocasionou em modificações acentuadas nos perfis topográficos apresentados, referentes aos oito

MDE's analisados. O único parâmetro que provocou uma mudança considerada e observada entre os perfis topográficos (Topo 6) foi o *Discretisation error fator*, este relativo à quantidade de suavização a ser adotada na conversão dos dados vetoriais de entrada em formato *raster*. Apesar da variação deste parâmetro em específico, num primeiro momento, suavizar o “efeito escada”, o resultado esperado no restante do modelo não pode ser estimado, bem como o erro a ser inserido no processo de interpolação.

Assim, visto as observações levantadas referentes às respostas obtidas nos perfis topográficos estimados dos oito MDE's, adotou-se, portanto, os seguintes procedimentos para a geração da modelagem, consistindo da melhor parametrização para efeito desta pesquisa:

- Tipo de dado de entrada: Os dados de entrada vetoriais, referentes ao aerolevantamento fotogramétrico e aos centróides do refinamento TOPODATA, foram convertidos para o formato *coverage*, e inseridos no algoritmo como linhas e pontos, após o procedimento de pré-processamento dos dados.
- Tipo de dados de elevação: Varia entre dados de contorno (*contour*) ou ponto (*spot*). Foi selecionado como dado principal os contornos relativos às curvas de nível, lembrando que este parâmetro não elimina os dados pontuais de elevação do processo de interpolação.
- Imposição de drenagem: Inserção dos dados vetoriais, corrigidos e orientados, relativos à rede de drenagem na interpolação a fim de garantir a consistência hidrológica do MDE. Essa é uma das vantagens da escolha desse algoritmo para a etapa de interpolação dos dados altimétricos.
- Número de Interações: Parâmetro referente ao número de interações definidas pelo usuário, em valor, na qual o interpolador parte de uma resolução mais grosseira e finaliza o processo de interpolação e imposição da drenagem na resolução previamente determinada pelo usuário. Nesse processo as depressões são identificadas e removidas. O valor utilizado foi de 40.
- Ajuste de Tolerâncias: São um conjunto de parâmetros de tolerância que possuem o intuito de suavizar os dados de entrada e remover as depressões espúrias inerentes ao processo de interpolação, principalmente na etapa de

imposição da drenagem vetorial. Visto as observações da análise empírica nos oito MDE's acima mencionado, o único parâmetro alterado foi o TOL1, isto é, parâmetro que reflete a acurácia e densidade dos dados pontuais de elevação. O valor selecionado deve corresponder à metade da equidistância das curvas de nível (CHAVES, 2002) referente a 2,5 metros. Os demais parâmetros tiveram seus valores *default* do algoritmo.

A Tabela 4.2 mostra os valores utilizados para a parametrização do processo de interpolação utilizando o algoritmo TOPOGRID, bem como o *default* do algoritmo implementado em ArcGIS 9.3.

Tabela 4.2 – Mostra os valores utilizados na parametrização do algoritmo TOPOGRID, bem como os valores padrão adotados pelo algoritmo.

Parâmetros - TOPOGRID	Descrição	Valor - Padrão	Valor - Utilizados
Tipo de dado de entrada	Os dados de entrada vetoriais que são utilizados pelo algoritmo no processo de interpolação podem ser linhas (curvas de nível), pontos (pontos cotados e/ou depressões conhecidas) e polígonos (limites da região de interesse e os contornos de lagos).	-	Dados vetoriais previamente ajustados (resolução espacial de 20 metros)
Tipo de Dado de Elevação	O usuário tem a possibilidade, no módulo de implementação do algoritmo TOPOGRID, de escolher quais os dados primários de elevação deseja considerar na parametrização do modelo, sendo eles de contorno (<i>contour</i>) ou ponto (<i>spot</i>). Vale lembrar que a escolha do dado primário não elimina o dado secundário de elevação do processo, situação que o usuário tenha curvas de nível e pontos cotados da área de interesse.	Contour	Contour
Imposição da drenagem	Uma vez informado nos dados de entrada a rede de drenagem (<i>stream</i>) estes são considerados pelo interpolador a fim de garantir a consistência hidrológica do MDE. Essa é uma das vantagens do interpolador utilizado para remoção de depressões associadas ao canal de drenagem, quando necessário.	ENFORCE	ENFORCE
Número de Interações	Parâmetro no qual o usuário determina o número de interações, em valores inteiros, a ser realizado no processo na qual a interpolação é realizada, começando com uma resolução grosseira e finalizando na resolução espacial determinada pelo usuário. Em cada interação a rede de drenagem anteriormente selecionada e imposta na modelagem matemática da altimetria e depressões e picos espúrios são identificados e removidos, sendo que os remanescentes são registrados no arquivo diagnóstico do módulo apresentado.	40	40
Ajustes de tolerância - TOL1	Reflete a acurácia e densidade dos pontos altimétricos de entrada em relação a superfície de drenagem	(em branco)	2,5
Ajustes de tolerância - TOL2	Previne o efeito indesejável da descontinuidade da drenagem que pode ser causada por um artefato irreal presente sobre a rede hidrográfica na qual se deseja "impor" no modelo	(em branco)	100
Penalidade de Rugosidade	Utilizado para suavizar o modelo. Parâmetro relativo a rugosidade do modelo.	(em branco)	0
Fator de erro de discretização	Parâmetro relativo à quantidade de suavização a ser adotada no processo de conversão dos dados vetoriais de entrada em formato <i>raster</i>	1	1

Além desta parametrização, o algoritmo permite ao usuário dados opcionais, tais como os parâmetros utilizados (.txt), a hidrografia digital gerada e utilizada na imposição, o quantitativo de depressões espúrias preenchidas, bem como as remanescentes. Este último importante para a validação da etapa de consistência hidrológica do MDE gerado.

Segundo Barbosa (2003), essa etapa aplicada isoladamente sobre os dados altimétricos de entrada, não garante a total consistência hidrológica do modelo em nível dos objetivos desta pesquisa, devido a geração de depressões espúrias remanescentes no decorrer do processamento, sendo necessário uma etapa de pós-processamento, em que se realizará a consistência hidrológica.

4.3. CONSISTÊNCIA HIDROLÓGICA DO MDE GERADO

Após a etapa de geração do MDE utilizando o algoritmo TOPOGRID é necessário a realização da consistência hidrológica do MDE a fim de se obter o Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente (MDEHC).

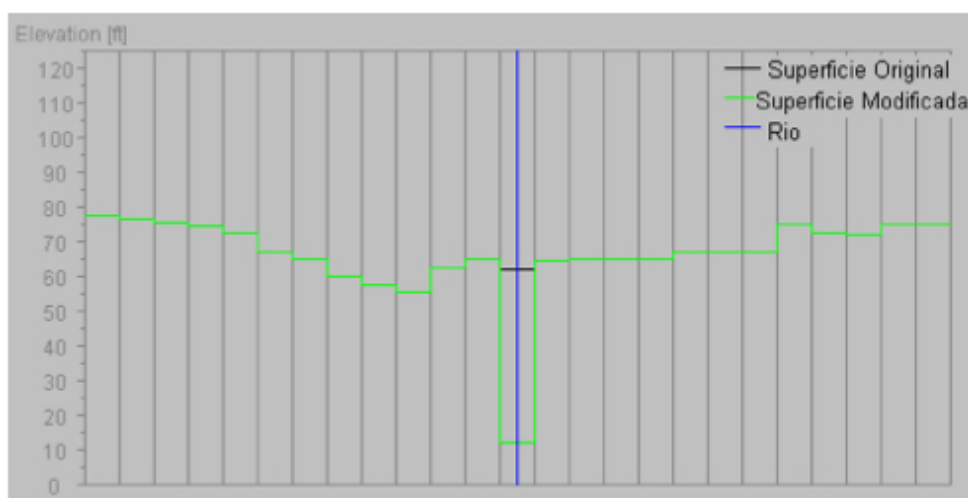
Dessa forma, esta etapa visou à eliminação das depressões espúrias remanescentes do processo de interpolação, que se caracterizam por áreas ou células cercadas por vizinhas com valores altimétricos superiores (WALLIS *et al.*, 2009), o que ocasiona a descontinuidade do escoamento superficial do modelo.

Para solucionar esse problema, O'Callaghan e Mark (1984) sugerem a aplicação de um filtro 3x3 para a identificação das áreas de depressão e do menor valor de altitude nesse perímetro, seguido da inversão de valores entre o ponto identificado e a depressão, conectando as células para que tenham um caminho superficial descendente disponível.

Além desta correção, a etapa de consistência hidrológica tem por objetivo garantir que a drenagem derivada do modelo seja coincidente com a rede hidrográfica vetorial utilizada, a proveniente do aerolevantamento fotogramétrico 1:10.000.

A primeira etapa na consistência hidrológica do MDE compreende na aplicação do algoritmo *Agree* (Hellweger, 1997), que diminui do valor altimétrico das células do modelo ao longo da drenagem vetorial. Para tanto, nesta etapa foi adotado o valor aleatório de 2.000 metros de rebaixamento apenas nas células coincidentes com a

drenagem vetorial adotada. A Figura 4.11 mostra, em um MDE hipotético, o procedimento apresentado.



Fonte: Modificado de AGREE – DEM Surface Reconditioning System, 1997)

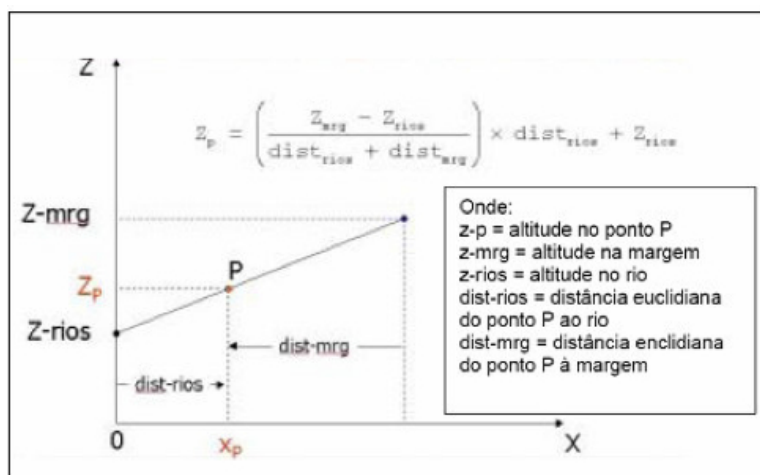
Figura 4.11 – Em um MDE hipotético, aplicação do algoritmo *Agree* na primeira etapa da consistência hidrológica. Percebe-se que apenas a célula coincidente ao canal de drenagem sofreu alteração altimétrica.

A segunda etapa compreende, por sua vez, na aplicação do algoritmo *Fill Sinks* que corrige as depressões espúrias remanescentes, por convolução, geradas na etapa de interpolação dos dados vetoriais, garantindo a conectividade do fluxo superficial do MDE. Nesta etapa foi selecionado o valor-limiar de 500 metros para a realização da operação, isto é, todas as depressões com profundidade até o valor-limiar previamente selecionado foram restauradas, mantendo sem alteração as células referentes à drenagem vetorial e alteradas na primeira etapa.

Realizado o preenchimento das depressões, por meio de álgebra de mapas, os valores originais de altimetria, “rebaixados” na primeira etapa metodológica da consistência hidrológica, foram reintegrados ao MDE.

A última etapa de consistência hidrológica tem por objetivo garantir a convergência do escoamento superficial das células vizinhas do canal de drenagem numérico. Essa é composta pela estruturação de talvegues²⁰, exemplificado na Figura 4.12, que corresponde ao processo matemático que utiliza distância euclidiana na elaboração das margens referente a drenagem vetorial.

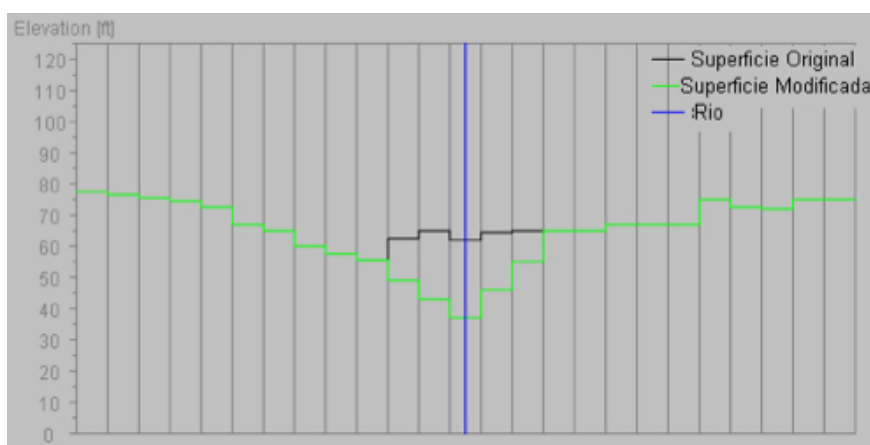
²⁰ Segundo Guerra (1997), é a linha de maior profundidade no leito fluvial. Resulta da intersecção dos planos das vertentes com dois sistemas de declives convergentes.



Fonte: Chaves, 2002

Figura 4.12 – Processo matemático de consistência dos talvegues.

Tal procedimento é a segunda aplicação do algoritmo *Agree*, com algumas modificações. Os talvegues foram estruturados com uma profundidade de 30 metros (diferença entre *Z-mrg* e *Z-rios*) e largura (somatório de *dist-rios* e *dist-mrg*) igual a 3 células referentes ao MDE, sendo que o decaimento de uma célula para a seguinte foi igual a 10 metros. A Figura 4.13 mostra este procedimento com base em um MDE hipotético.



Fonte: Modificado de AGREE – DEM Surface Reconditioning System, 1997

Figura 4.13 – Estruturação do talvegue em um MDE hipotético. Nesse caso é visível a alteração dos valores altimétricos da célula coincidente com o canal de drenagem e de seus vizinhos, estruturando o respectivo talvegue.

Porém, antes da realização da supramencionada etapa metodológica, a rede hidrográfica vetorial utilizada na etapa de interpolação dos dados altimétricos foi ajustada com a finalidade de garantir a integridade dos talvegues constituídos após uma reaplicação do algoritmo *Fill Sinks*. Esta edição na referida rede hidrográfica

vetorial consistiu da continuidade do traçado dos canais de drenagem até o limite do MDE gerado, uma vez que os dados hidrográficos de entrada eram relativos apenas ao limite político-administrativo do DF.

Segundo Djokic (2008), após a utilização do algoritmo de imposição de drenagem *Agree*, principalmente para a estruturação de talvegues, é necessário a reaplicação do algoritmo referente ao preenchimento de depressões espúrias (*Fill Sinks*), uma vez que estas podem vir a ser introduzidas pelo uso deste processo de imposição.

Assim, sem o devido ajuste da rede de drenagem para ser utilizada na etapa de estruturação dos talvegues, o algoritmo de correção de depressões espúrias pode vir a preencher os talvegues constituídos, efeito indesejável aos objetivos desta pesquisa. A Figura 4.14 mostra uma representação espacial da rede de drenagem vetorial utilizada na etapa de interpolação dos dados altimétricos, bem como o ajuste realizado com o intuito de garantir a estruturação e permanência dos talvegues após a reaplicação do algoritmo *Fill Sinks*.

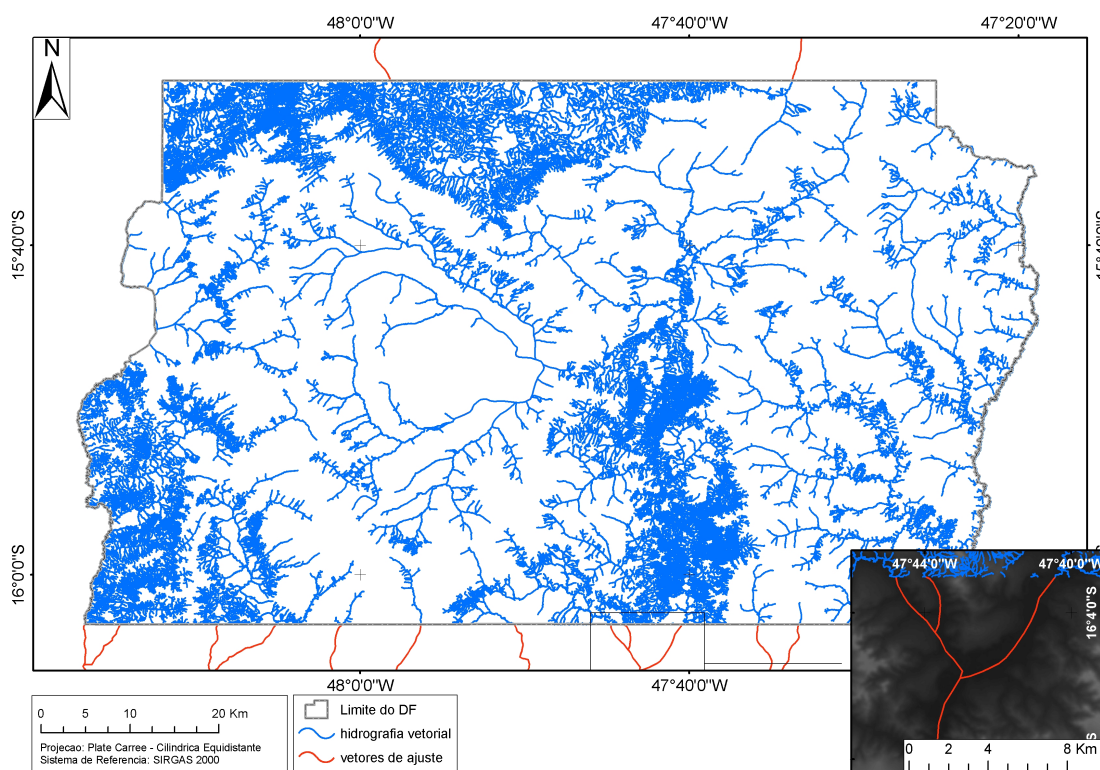


Figura 4.14 – Representação espacial da hidrografia vetorial utilizada (em cor azul) na etapa de interpolação junto com os vetores de ajuste (em cor vermelha) com o intuito de garantir a estruturação dos talvegues no MDEHC.

Portanto o objetivo maior das etapas de consistência hidrológica acima mencionada é garantir o escoamento superficial adequado para as análises futuras de extração das UH's, ao realizar o preenchimento das depressões residuais da etapa de interpolação e eliminar os “falsos” canais de drenagem.

4.4. VALIDAÇÃO ALTIMÉTRICA DO MDEHC ELABORADO

Todo modelo digital de elevação, hidrologicamente consistente ou não, deve representar a realidade do espaço da forma mais acurada possível. Assim a presente etapa metodológica tem por finalidade avaliar os dados altimétricos estimados no MDEHC e identificar a representatividade do mesmo para os objetivos desta pesquisa.

Para esta avaliação foi utilizado o cálculo do erro médio quadrático (EMQ) do MDEHC e analisado junto às Normas Técnicas da Cartografia Nacional. Esta estimativa de erro considerou os 276 pontos de controle que foram previamente separados do processo de interpolação (entre um conjunto total de 42.353 pontos cotados) (Figura 4.3) e os valores com equivalência espacial estimados através da etapa de interpolação, resultante do MDEHC. Segundo Miceli *et al.* (2010), o EMQ é calculado pela seguinte formulação (Fórmula 4.1):

$$EMQ = \sqrt{\frac{\sum (Z_i - Z_t)^2}{n - 1}} \quad (4.1)$$

Onde:

Z_i - Corresponde ao valor altimétrico do MDE.

Z_t – Corresponde ao valor altimétrico da amostra.

n - número total de amostras utilizadas.

Com o intuito de se definir a classe cartográfica de precisão do modelo, o EMQ estimado deve estar abaixo do Erro Padrão (EP), sendo que 90% dos dados amostrados e analisados devem ser inferiores, por sua vez, ao Padrão de Exatidão Cartográfico (PEC) da respectiva classe (Decreto 89.817/84). A Tabela 4.3 mostra a relação numérica instituída pela Norma Técnica da Cartográfica Nacional. A Tabela 4.4 mostra os parâmetros a serem considerados relativos a equidistância na escala 1:100.000.

Tabela 4.3 - Parâmetros instituídos para validação altimétrica e planimétrica de produtos cartográficos segundo as classes presente nos artigos do Decreto nº 89.817/84.

Classe	Planimétrica		Altimétrica	
	PEC (mm)	EP(mm)	PEC (Eq)	EP (Eq)
A	0,5	0,3	1/2	1/3
B	0,8	0,5	3/5	2/5
C	1	0,6	3/4	1/2

Fonte: Normas Técnicas da Cartografia Nacional, presente no Decreto n 89.817/84, de 20/06/84

Tabela 4.4 - Valores altimétricos a serem adotados para esta avaliação segundo a equidistância da escala de análise – 1:100.000.

Altimétrico – (Equidistância 50 m)		
Classe	PEC (Eq)	EP (Eq)
A	25	16,5
B	30	20
C	37,5	25

Fonte: Normas Técnicas da Cartografia Nacional, presente no Decreto n 89.817/84, de 20/06/84

4.5. DETERMINAÇÃO DAS ÁREAS DE CONTRIBUIÇÃO E DELIMITAÇÃO DAS UH'S – ÁREA-TESTE BACIA HIDROGRÁFICA DO LAGO PARANOÁ

Antes da realização da delimitação relativa às 36 UH's do DF, foi realizado em uma área-teste a extração individualizada de UH aplicando a metodologia para geração de dados de áreas de contribuição provenientes dos métodos intitulados D8 e do D ∞ .

O objetivo desta etapa é compreender melhor, em uma área de teste com extensões geográficas menores do que a área do objeto de estudo, em que medida a aplicação que cada um destes métodos de estimativa de área de contribuição pode influenciar na derivação das UH's, principalmente considerando o refinamento na resolução espacial do MDE (20 metros para 7 metros).

A Bacia Hidrográfica do Lago Paranoá foi selecionada, pois encontra-se totalmente inserida no DF, e possui dados na escala 1:10.000 provenientes do aerolevante fotogramétrico. A Figura 4.15 mostra o contexto espacial, ambiental e morfométrico da citada bacia hidrográfica selecionada como área teste.

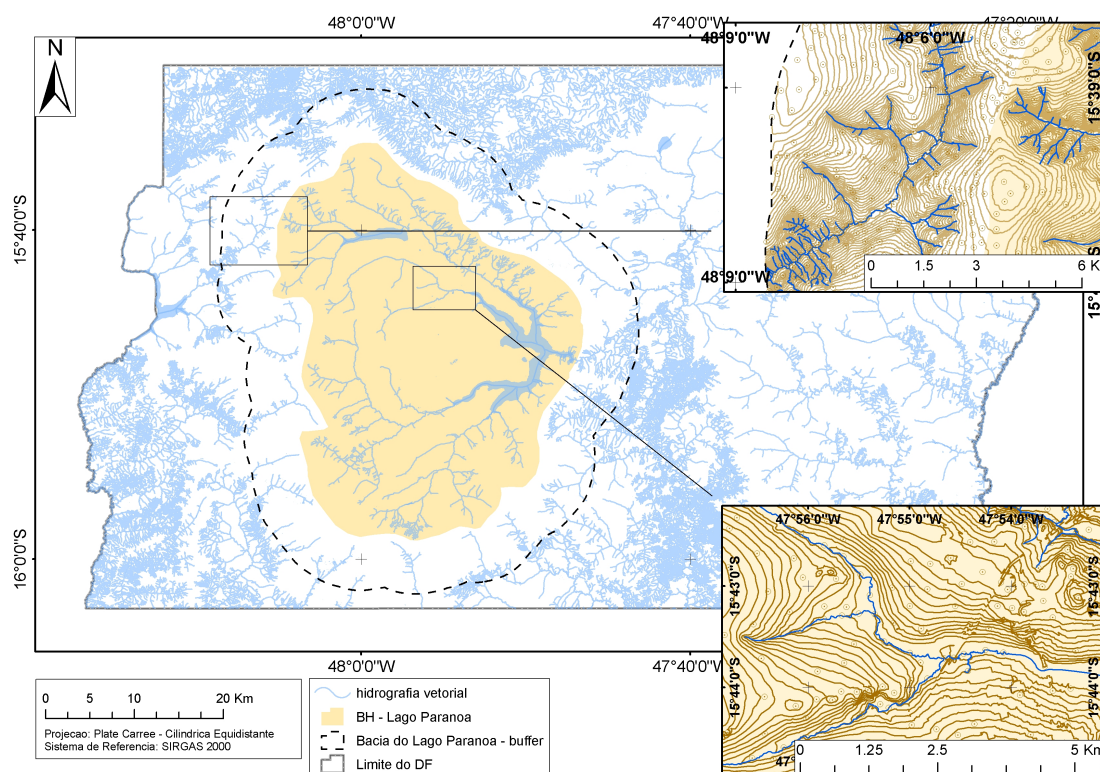


Figura 4.15 – Contexto espacial da bacia hidrográfica do Lago Paranoá selecionada como área-teste (cor bege), bem como o *buffer* de 6 km utilizado para a seleção dos dados vetoriais de entrada para o processo de interpolação, com o intuito de eliminar o efeito de borda

A Bacia Hidrográfica do Lago Paranoá possui 5 UH's, segundo o mapeamento de unidades hidrográficas da CODEPLAN de 1994, a saber:

- UH Santa Maria;
- UH Bananal;
- UH Riacho Fundo;
- UH Lago Paranoá;
- UH Ribeirão do Gama;

A Figura 4.16 mostra a disposição espacial das 5 (cinco) citadas UH's.

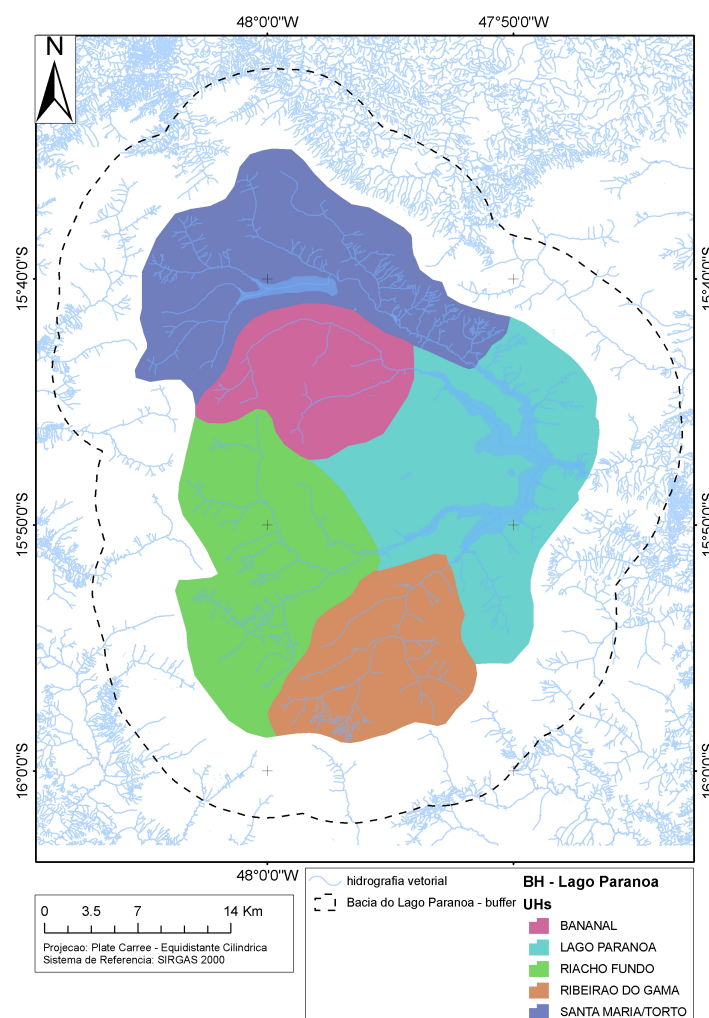
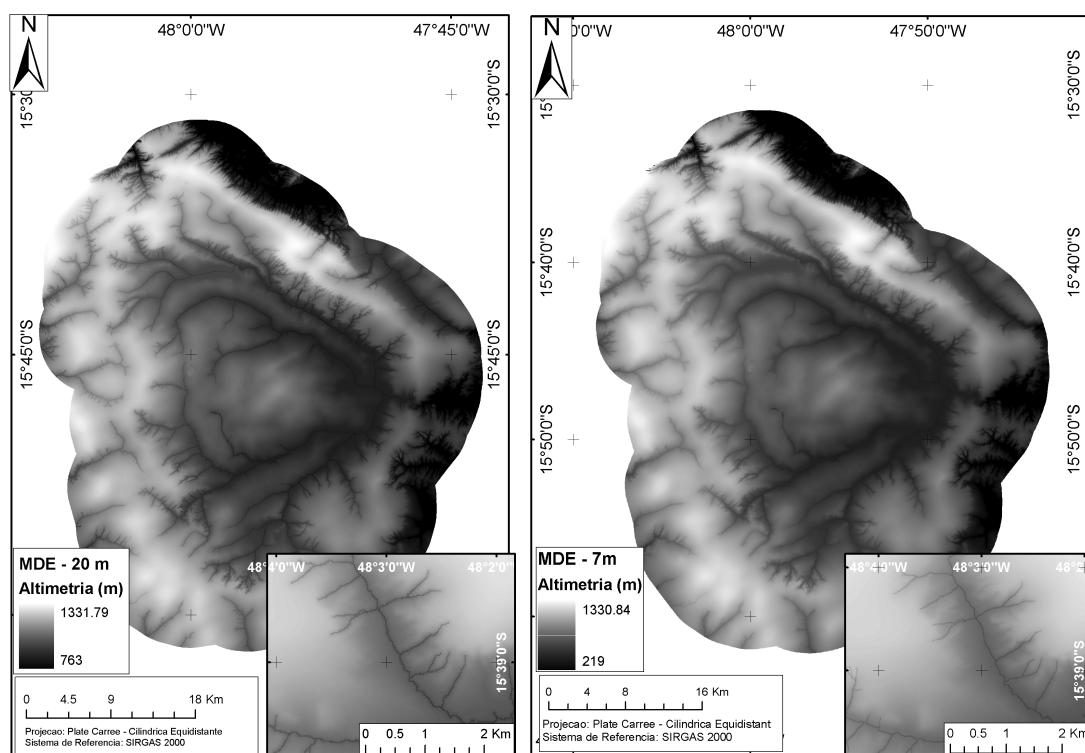


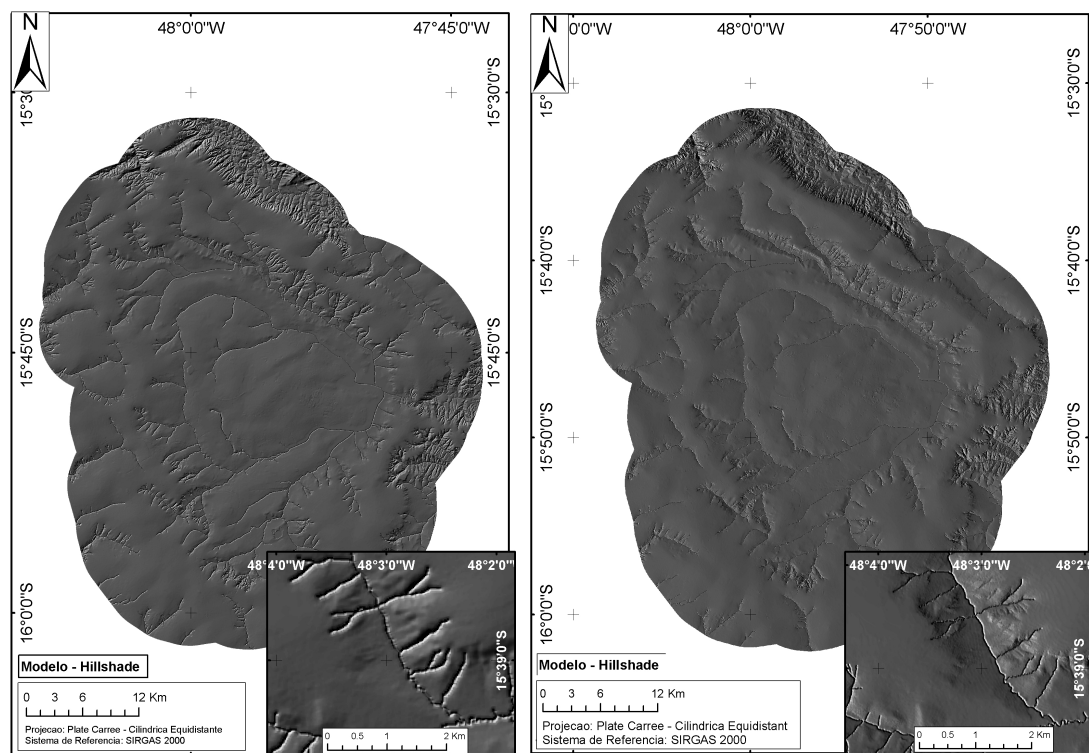
Figura 4.16 – Unidades Hidrográficas pertencentes à bacia hidrográfica do Lago Paranoá (Fonte: Mapa de Unidades Hidrográficas do DF – 1994 – SEMATEC/CODEPLAN – Escala 1:100.000).

Esta etapa corresponde a análise do comportamento de cada um dos métodos de estimativa de área de contribuição aqui envolvidos, para a derivação das 5 UH's desejadas. Assim, atendendo a um dos objetivos específicos desta pesquisa, os testes foram realizados em dois MDE's referentes à mesma área-teste, um com resolução espacial de 20 metros e o outro com resolução espacial de 7 metros. Esta etapa teve o intuito de entender a influência do refinamento do modelo na resposta de cada método aqui considerado. A Figura 4.17 mostra os dois MDE envolvidos nesta análise.



(a)

(b)



(c)

(d)

Figura 4.17 – MDE's de base de teste para a estimativa das áreas de contribuição utilizando os dois métodos envolvidos. (a) MDE consistido com 20 metros de

resolução espacial. **(b)** MDE consistido com 7 metros de resolução espacial. Podem-se perceber os talwegues constituídos em cada modelo. **(c)** MDE - 20 metros *hillshade*. **(d)** MDE – 7 metros *hillshade*.

Com base nos MDE's apresentados, foram estimados os 5 (cinco) exutórios (*outlets*) relativos a cada uma das UH's propostas para delimitação. Estes pontos de saída foram localizados com base na área de contribuição obtida pelo método D_{∞} , isto é, a partir do ponto de maior concentração de fluxo para cada UH. A Figura 4.18 apresenta os respectivos exutórios determinados com base na célula de maior concentração do produto derivado do método D_{∞} , representado segundo a função Log_{10} .

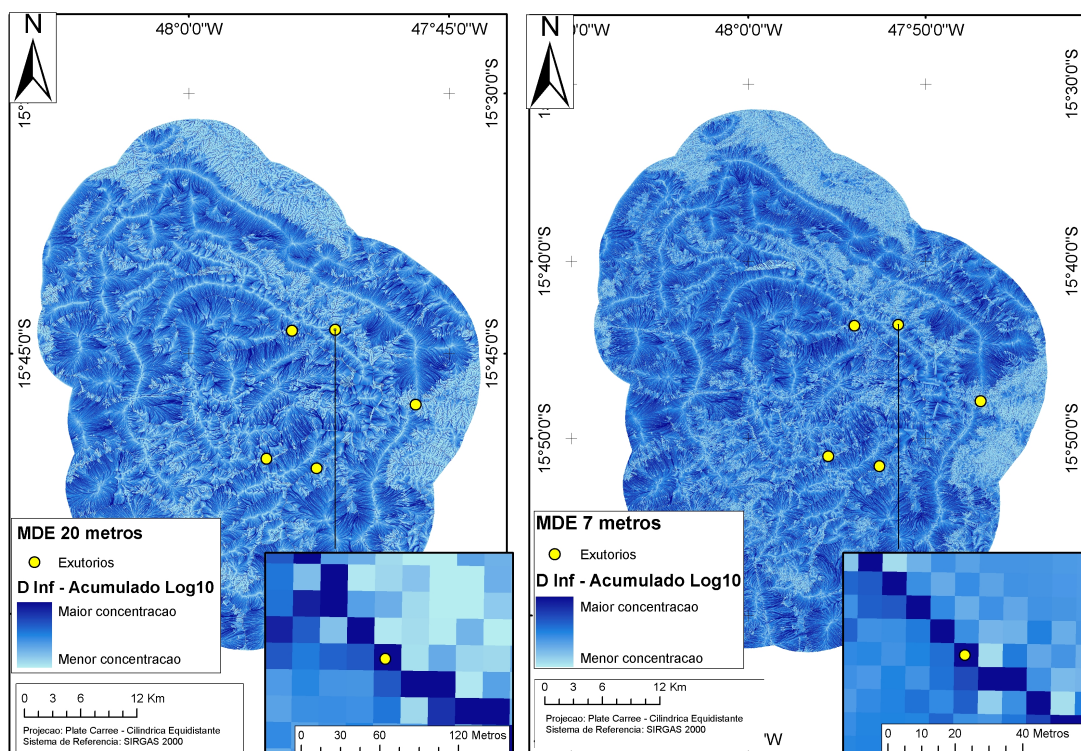
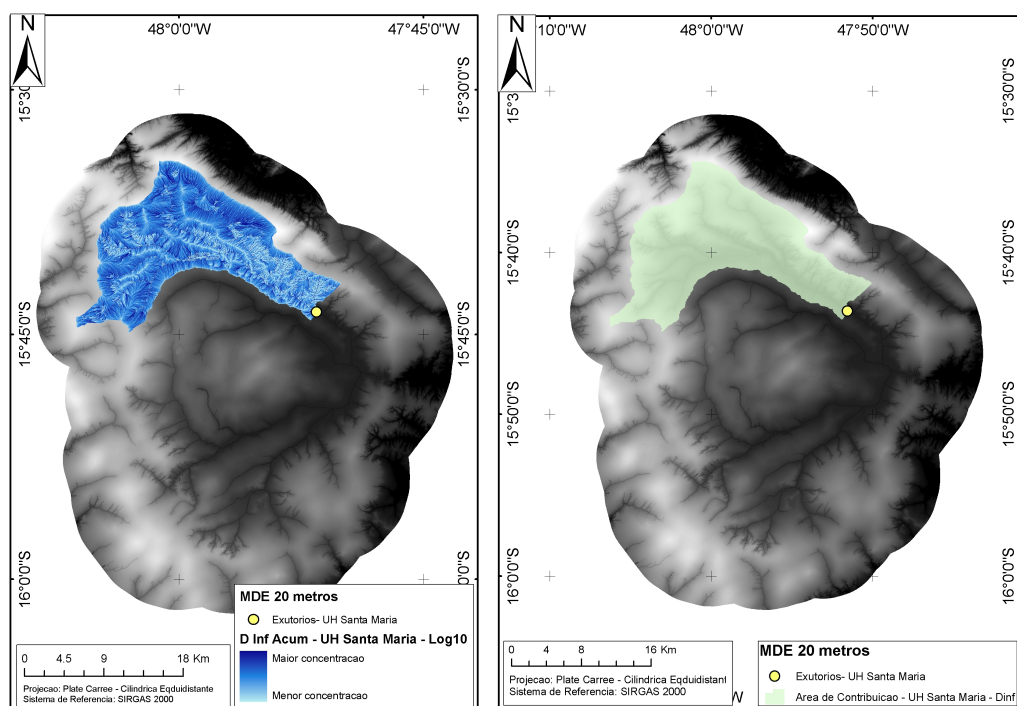


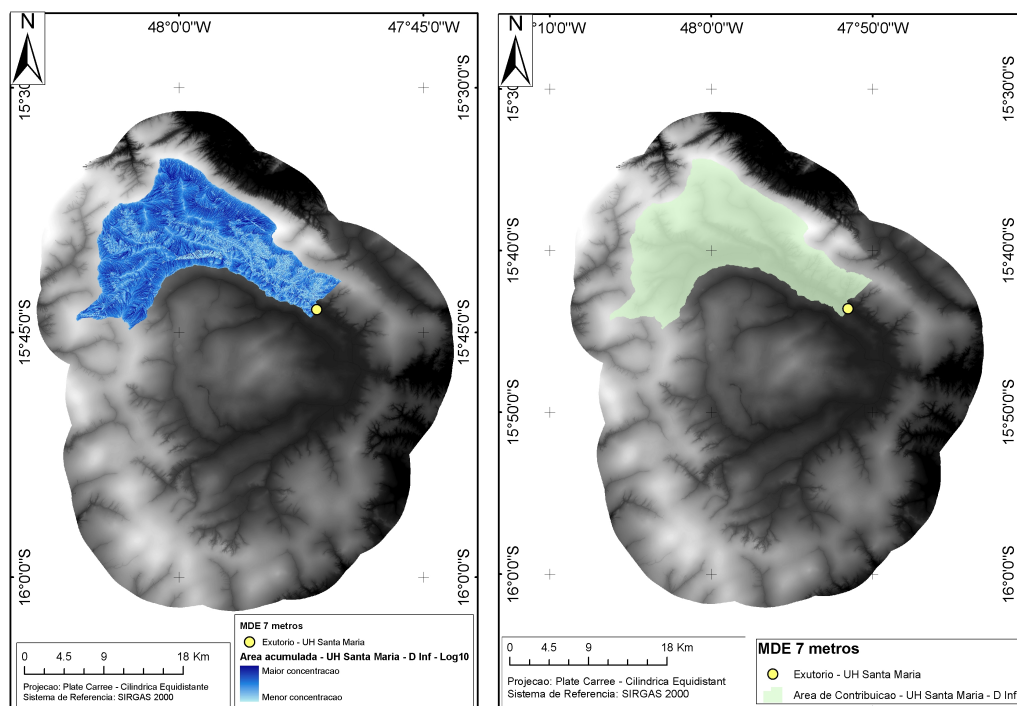
Figura 4.18 – Apresenta os cinco exutórios (em cor amarela) localizados com base na área de contribuição calculado pelo método D_{∞} , representado pela função Log_{10} .

Destarte, com a localização de cada ponto de saída das respectivas UH's junto aos produtos direcionais D_8 e D_{∞} , foi possível estimar, individualmente, a área de contribuição a montante de cada exutório previamente selecionado. Vale lembrar que os produtos finais raster elaborados foram convertidos para o formato vetorial com o intuito de melhorar a representação cartográfica ao leitor. A Figura 4.19

mostra, como exemplo metodológico, a UH Santa Maria estimada individualmente a partir do método acima descrito, e sua posterior conversão para formato vetorial.



(a)



(b)

Figura 4.19 – Exemplo do roteiro metodológico proposto para a extração e estimativa individualizada da UH Santa Maria a partir do ponto de exutório

previamente determinado, bem como a conversão da mesma para o formato vetorial. **(a)** Exemplo em aplicação no MDE 20 metros. **(b)** Exemplo em aplicação no MDE 7 metros.

Apesar da Figura 4.18 apenas mostrar o roteiro metodológico adotado neste teste com a utilização do método D^∞ , vale ressaltar que foram realizados as devidas delimitações das UH's utilizando os dois métodos aqui discutidos, cujos resultados serão discutidos posteriormente.

4.6. DELIMITAÇÃO DAS UNIDADES HIDROGRÁFICAS (UH'S) COM BASE NO MDEHC ELABORADO

Nessa etapa foi utilizado os algoritmos presente no *TauDEM* versão 5.0 (TARBOTON e MOHAMMED, 2010). Este aplicativo apresenta ao usuário a possibilidade de utilização de um conjunto amplo de ferramentas de análise e extração de informações hidrológicas, utilizando como base os MDE's, segundo seus interesses de pesquisa.

A importância desse ferramental para a pesquisa consiste na utilização computacional dos algoritmos referentes ao D8, bem como o D^∞ , para a delimitação das Unidades Hidrográficas de interesse. A Figura 4.20, a seguir, mostra o fluxograma referente a etapa de delimitação das respectivas Unidades Hidrográficas, adotando como base os algoritmos presentes no supramencionado *software*.

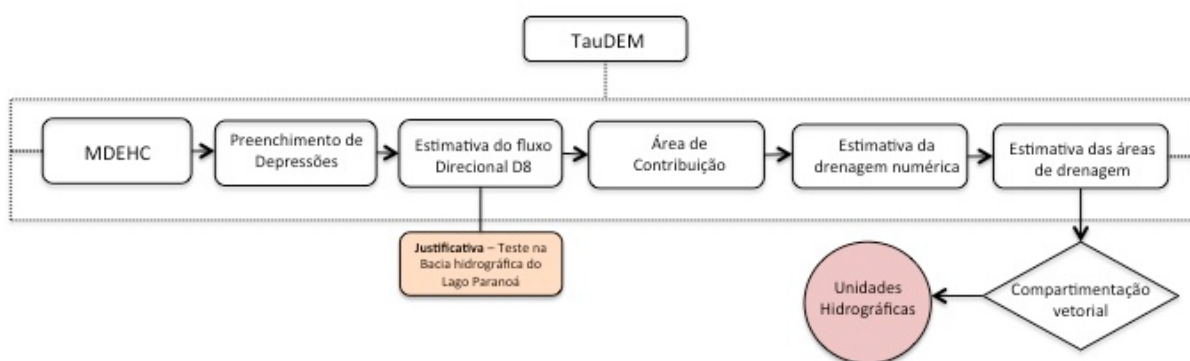
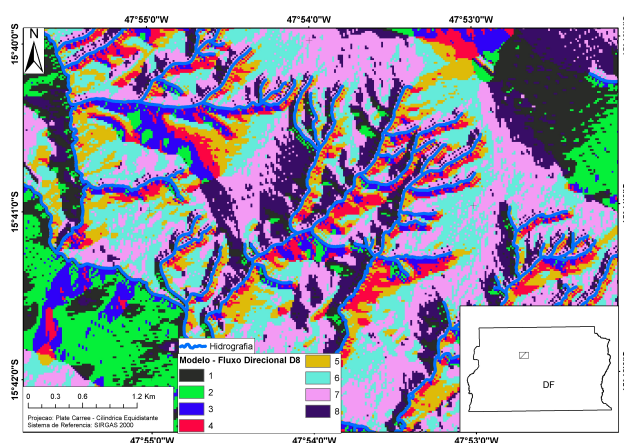


Figura 4.20 – Fluxograma metodológico das etapas de delimitação das 36 Unidades Hidrográficas, com base no MDEHC previamente estimado.

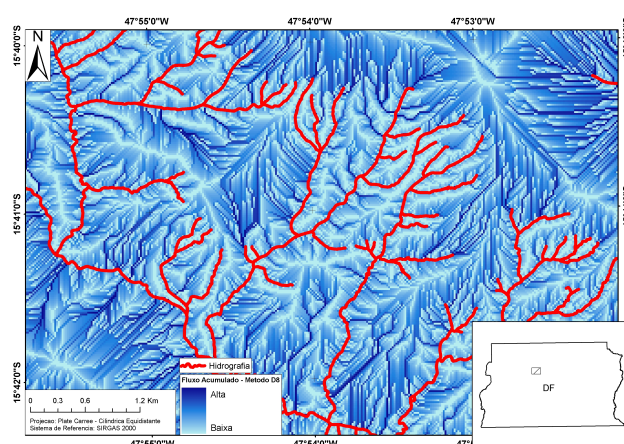
Pode-se perceber que apenas as primeiras 6 (seis) etapas envolveram a utilização dos algoritmos implementados no âmbito do *software* *TauDEM*, sendo que o restante das etapas envolveram operações vetoriais simples para a delimitação das 36 UH's no âmbito do Distrito Federal.

A primeira etapa foi referente ao preenchimento de depressões espúrias sobre o modelo de entrada, no caso o MDEHC. O objetivo dessa é semelhante aos passos metodológicos já mencionados neste capítulo, sendo apenas uma obrigação intrínseca do algoritmo adotado para o prosseguimento com as etapas posteriores.

A segunda etapa corresponde na estimativa do modelo de direção de fluxo do MDEHC, com base no método D8 (O'CALLAGHAN e MARK, 1984). A partir dessa derivação é possível estimar a área de contribuição (modelo de acumulação de fluxo) de cada célula do MDEHC. A Figura 4.21 mostra, como exemplo, a representação do modelo direcional D8 e a estimativa da área de contribuição (em \log_{10}) localizada na porção noroeste da área de interesse da pesquisa.



(a)



(b)

Figura 4.21 – (a) Exemplo do modelo de direção de fluxo elaborado utilizando o método D8 da porção noroeste do Distrito Federal. (b) Exemplo do modelo de acumulação de fluxo derivado do modelo direcional da mesma porção noroeste.

A drenagem numérica é derivada com base no modelo de acumulação de fluxo e representa uma matriz quadrada e binária que será adotada na modelagem hidrológica, composta de células referentes a rede de drenagem (valor 1) e células que não são classificadas como integrantes da rede de drenagem (valor 0).

Segundo Tarboton e Mohammed (2010) existem diversos algoritmos para a estimativa desse dado, de suma importância para a delimitação de bacias hidrográficas, que compreendem desde a simples definição empírica de um limiar numérico sobre o modelo de acumulação de fluxo; a utilização de algoritmos mais complexos que envolvem variáveis geomorfológicas com o intuito de considerar a textura topográfica e a variabilidade espacial da densidade de drenagem na definição do limiar acima mencionado.

O método aqui adotado foi a definição empírica de um limiar relativo ao valor de 1000 células. Esse parâmetro é adotado pelo algoritmo *TauDEM* com o intuito de definir o limiar na definição do modelo de drenagem numérica, isto é, as células com valor de acumulação de fluxo igual ou superior a 1000 foram classificadas como pertencentes a rede de drenagem numérica, sendo-lhes atribuída o valor 1. Este valor, empiricamente determinado, foi adotado pois garantiu a densidade da malha hídrica numérica condizente aos objetivos da pesquisa, isto é, não detalhou nem generalizou demasiadamente a fim de inviabilizar a subsequente delimitação das áreas de drenagem e compartimentação de UH's. A Figura 4.22 mostra uma porção do modelo de drenagem numérico utilizado na presente pesquisa.

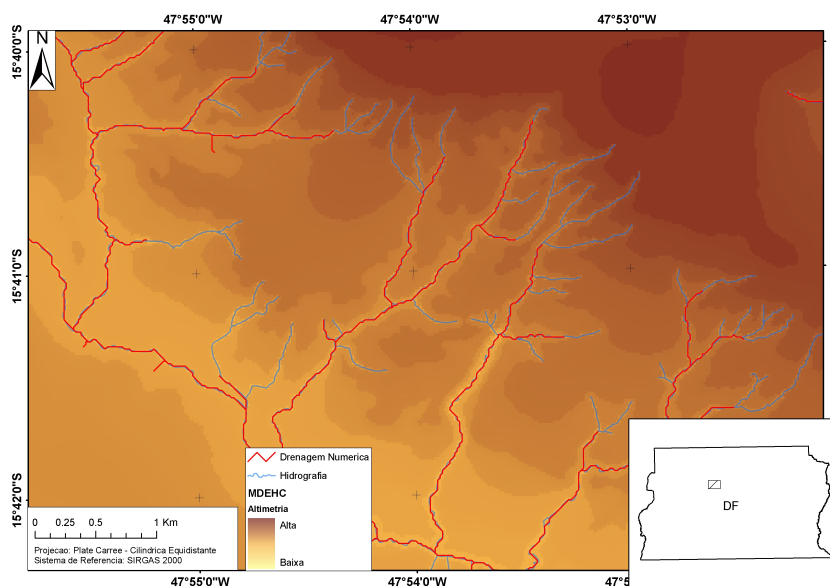
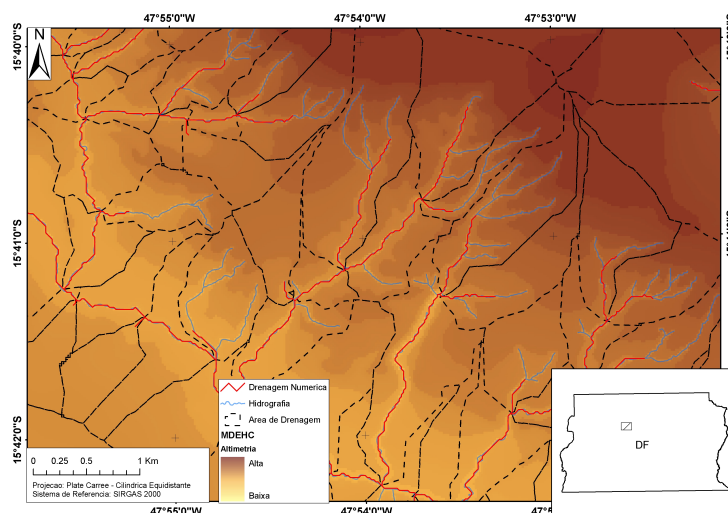
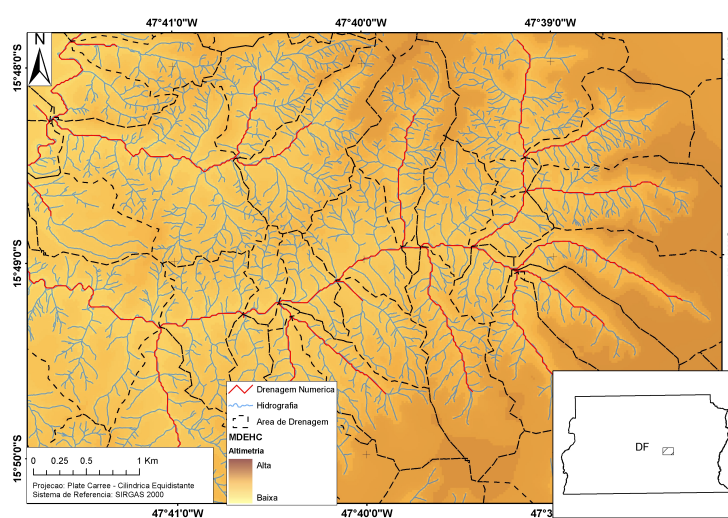


Figura 4.22 – Mostra exemplo da drenagem numérica extraída utilizando o limiar de 1000 células na porção noroeste do DF.

Com base na drenagem numérica estimada, é possível identificar a área de drenagem de cada trecho de curso d'água relativo a esse modelo distribuído. Vale ressaltar que os divisores d'água aqui delimitados foram derivados do MDEHC, utilizado de insumo nesse procedimento metodológico. A Figura 4.23 mostra uma porção do modelo com a drenagem numérica estimada, bem como suas respectivas áreas de drenagem.



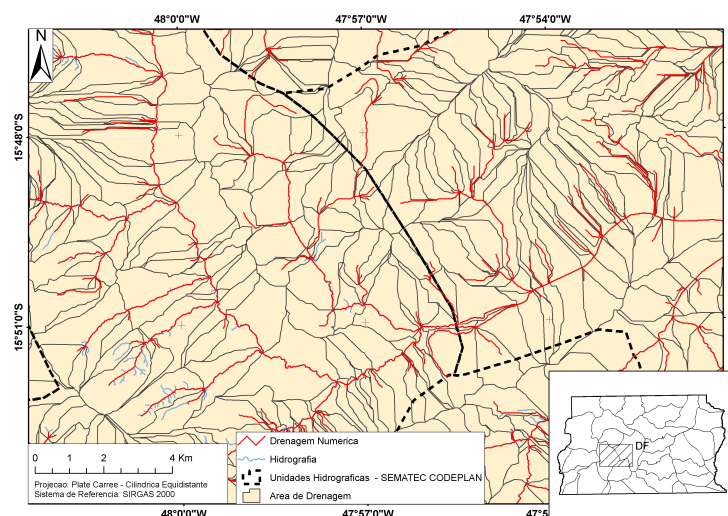
(a)



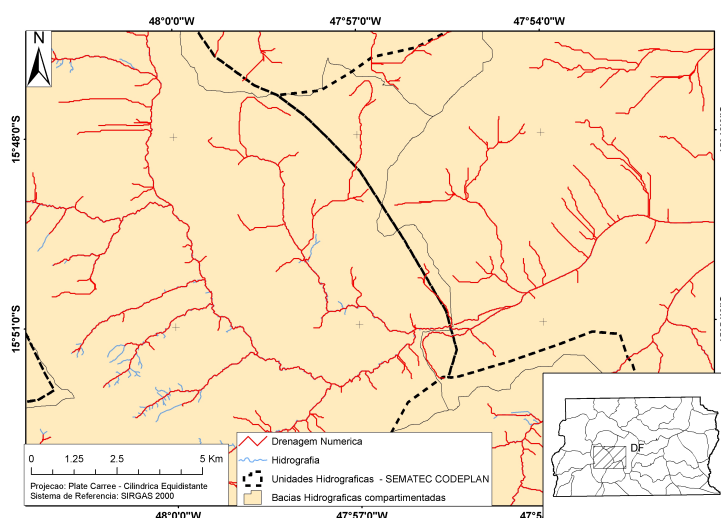
(b)

Figura 4.23 – Mostra, em duas situações geográficas distintas, as áreas de drenagem extraídas de cada trecho de curso d'água da drenagem numérica elaborada. **(a)** Situação em relevo mais plano; **(b)** Situação em relevo dissecado.

E, finalmente, as áreas de drenagem estimadas foram agrupadas (compartimentação vetorial) segundo as UH's previamente informadas nos produtos de referência desta pesquisa. Além das citadas UH's, também foi utilizado como insumos a drenagem numérica. O objetivo desta etapa foi identificar a área de drenagem que representava o exutório de cada uma das 36 Unidades Hidrográficas de interesse. A Figura 4.24 mostra um exemplo desta etapa de ajuste vetorial sobre as áreas de drenagem estimadas e a compartimentação em bacias hidrográficas segundo o exutório de cada uma das UH's.



(a)



(b)

Figura 4.24 – (a) Mostra, numa porção central do DF, as informações vetoriais utilizadas para compartimentar as áreas de drenagem em Unidades Hidrográficas segundo o mapeamento de referência; **(b)** Exemplo da compartimentação vetorial realizadas sobre as áreas de drenagem.

Após esses ajustes vetoriais, foi executado uma compatibilização da tabela de atributos referente as informações presentes nas UH's de referência deste trabalho, relativo a coluna de nome da UH, nome da bacia hidrográfica na qual a mesma está inserida, e nome da região hidrográfica de abrangência da informação.

CAPÍTULO V

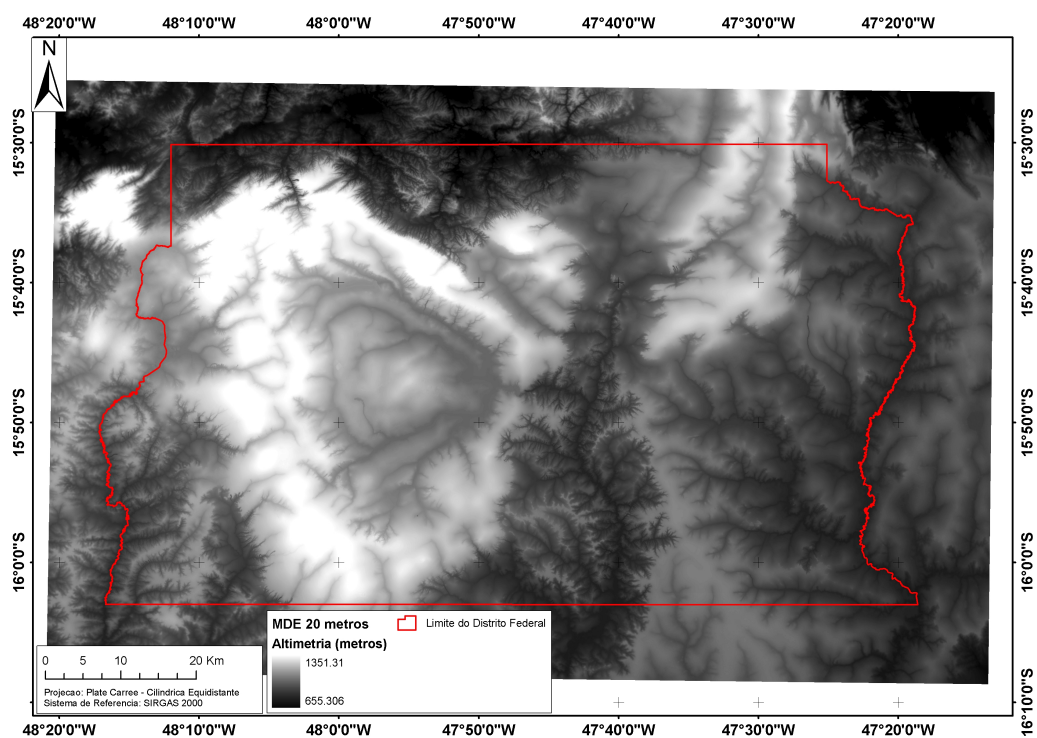
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados alcançados por meio da execução das etapas metodológicas descritas no capítulo anterior, tais como a elaboração do MDE, os produtos da consistência hidrológica proposta, bem como os resultados do teste realizado na Bacia Hidrográfica do Lago Paranoá para a discussão a respeito dos dois métodos envolvidos nesta pesquisa de estimativa de área de contribuição. Além destes, será apresentada a avaliação cartográfica altimétrica do MDEHC elaborado.

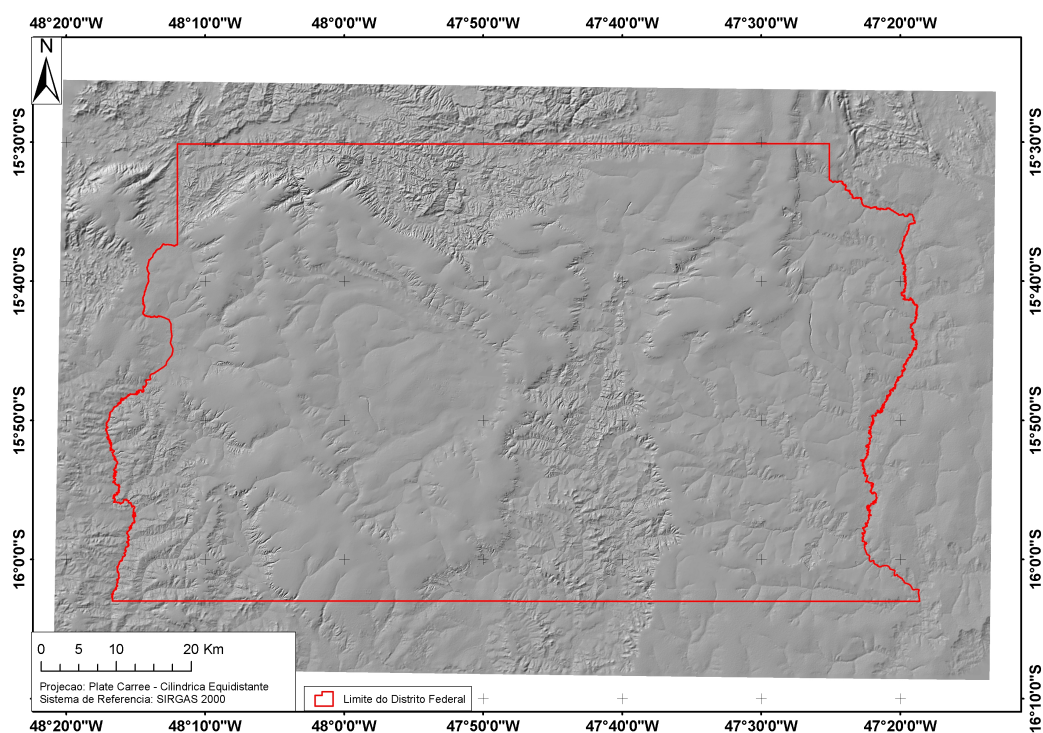
Em um segundo momento deste capítulo será mostrado e discutido o resultado alcançado relativo a delimitação das 36 UH's para o DF, utilizando o método direcional D8, em relação ao *Mapa das Unidades Hidrográficas do DF*, apresentado previamente no capítulo I.

5.1. MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO (MDE)

A partir do tratamento dos dados vetoriais de entrada, foi aplicado o algoritmo TOPOGRID, implementado em Arc/INFO 9 e/ou ArcGIS 9.3.1, para a elaboração do MDE proposto segundo as etapas metodológicas. A Figura 5.1 mostra o MDE gerado, com resolução espacial de 20 metros, utilizando a metodologia e a parametrização previamente definida para o processo de interpolação.



(a)



(b)

Figura 5.1 – (a) MDE gerado, com 20 metros de resolução espacial, adotando a parametrização previamente discutida na utilização do algoritmo TOPOGRID. **(b)** Representação em *hillshade*.

Apesar de ser conhecido como um interpolador para uso de fins hidrológicos, contendo em sua rotina algoritmos de consistência hidrológica, sua simples aplicação não alcançou o nível esperado e necessário para atender os objetivos desta pesquisa, tais como a correção das depressões remanescentes e a estruturação dos talvegues. A Figura 5.2 apresenta as depressões “espúrias” remanescentes, representadas em formato pontual, após a etapa de execução da interpolação dos dados de entrada. O produto apresentado a seguir é proveniente do próprio algoritmo de interpolação adotado, que estima as depressões remanescentes que o processo não conseguiu ajustar conforme a parametrização do modelo.

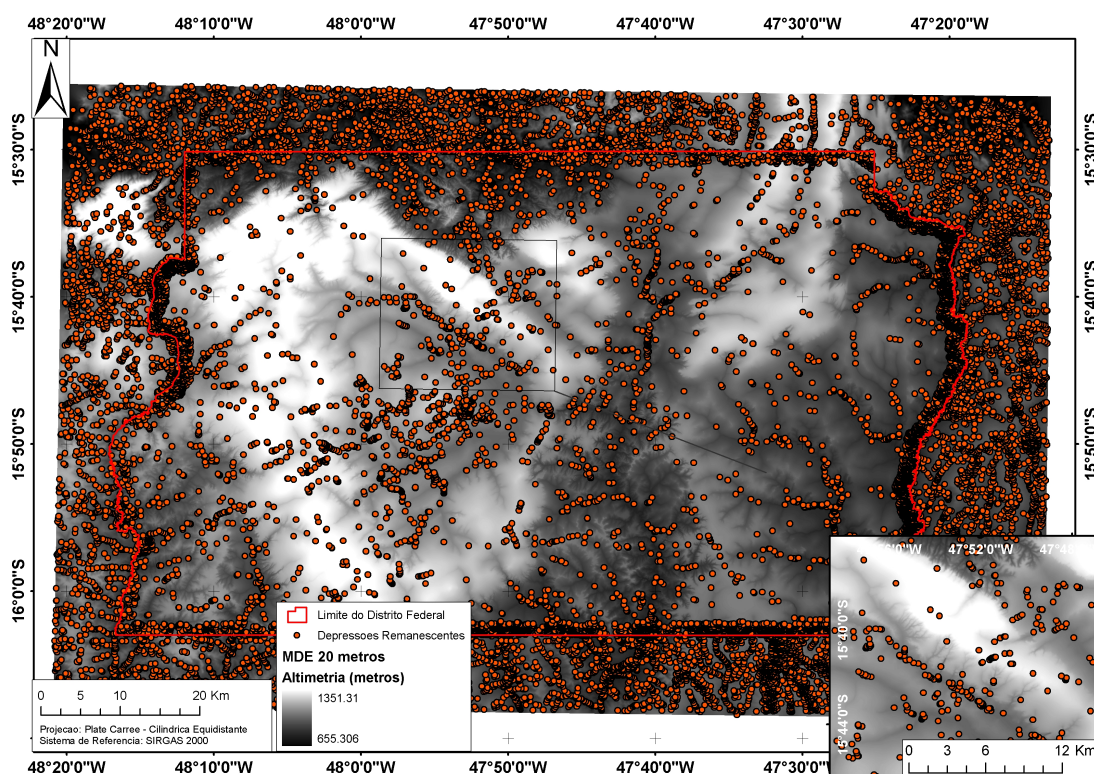


Figura 5.2 – Depressões “espúrias” remanescentes do processo de interpolação dos dados altimétricos de entrada.

Pode-se perceber que uma quantidade elevada de depressões (total de 23.007) ainda ficou presente neste MDE, tanto em áreas de topo de relevo como próximas aos canais de drenagem. Estas últimas podem ser explicadas pela imposição da drenagem vetorial de entrada durante a estimativa dos valores interpolados.

O principal problema da presença destas depressões no MDE é com relação ao comportamento do fluxo superficial da água que, conseqüentemente, adota outro caminho de escoamento distinto da drenagem inicialmente mapeada. Assim é necessária a consistência hidrológica, conforme proposto no capítulo III, para garantir o escoamento superficial no MDE, bem como garantir a disposição da rede de drenagem numérica conforme a drenagem vetorial de entrada.

5.2. CONSISTÊNCIA HIDROLÓGICA E O MDEHC

A primeira etapa consistiu da aplicação do algoritmo *Agree* adotando o valor constante de “rebaixamento” igual a 2.000 metros fez com que os menores valores de altimetria do MDE passassem para valores negativos, relativos ao “rebaixamento” adotado (Figura 5.3).

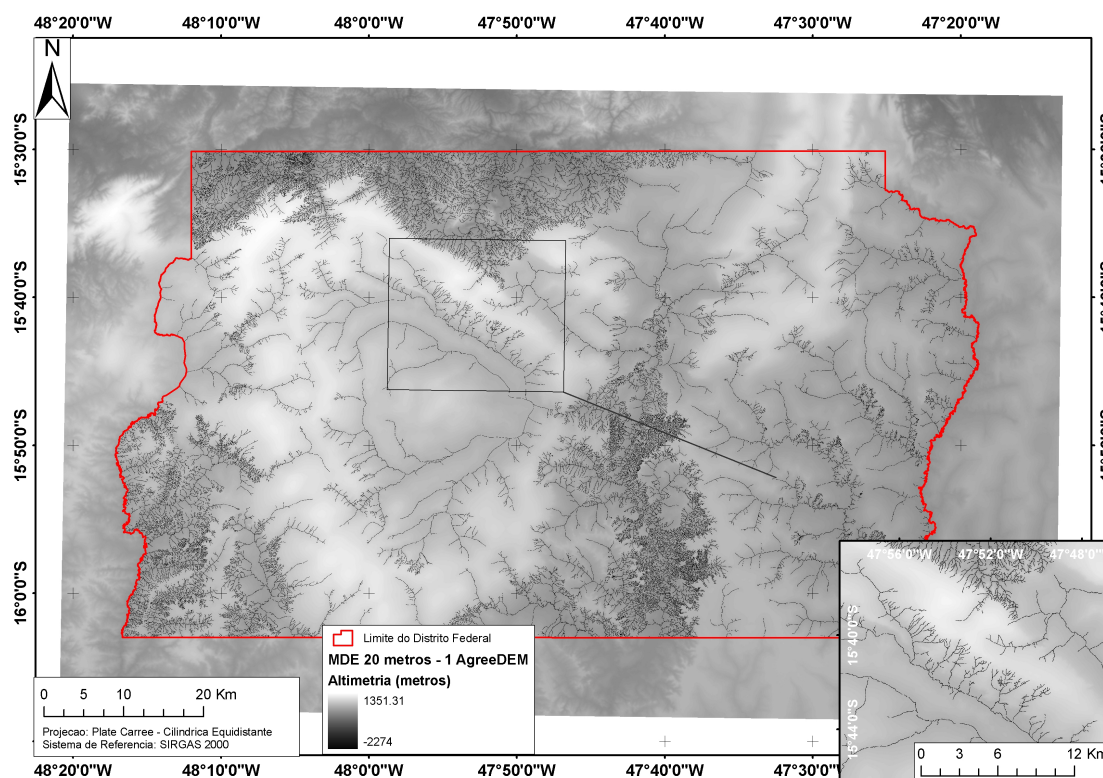
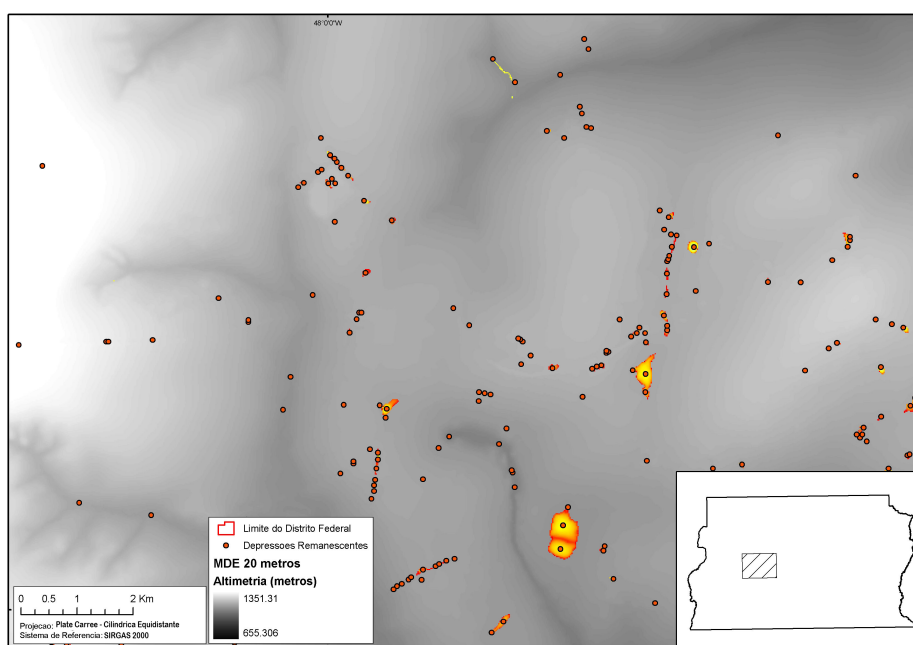


Figura 5.3 – Resultado do “rebaixamento” realizado na célula correspondente a drenagem vetorial de entrada por meio da aplicação do algoritmo *Agree*.

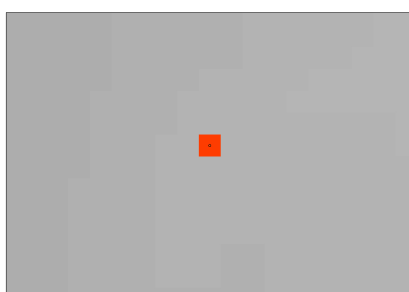
A correção do escoamento superficial se deu, primeiramente, com a aplicação do algoritmo *Fill Sinks* utilizando o valor-limiar igual a 500 metros, ou seja, apenas as depressões que não pertenciam às células relativas ao canal de drenagem vetorial foram preenchidas. O objetivo desta etapa é garantir, após a recuperação dos

valores previamente “rebaixados”, o escoamento estimado pelo próprio processo de interpolação. A Figura 5.4 mostra uma representação espacial das depressões remanescentes do modelo e as localizações que sofreram o devido preenchimento nesta etapa de consistência hidrológica.

A representação utilizando \log_{10} teve o intuito de reduzir a amplitude dos dados com a finalidade de visualização da informação por parte do leitor, no caso a diferença entre o MDE original e o MDE com as depressões preenchidas (fruto da primeira aplicação do algoritmo *Fill Sinks*). Algumas depressões correspondiam a áreas superiores a uma célula do modelo, porém grande parte das depressões ajustadas era equivalente à própria célula incidente no modelo (Figura 5.4 b).



(a)



(b)

Figura 5.4 – (a) Amostra de parte das depressões remanescentes da etapa de interpolação, bem como aos locais que sofreram preenchimento (Representação em

Log10 em coloração alaranjada). **(b)** Representação em \log_{10} de local cuja depressão foi preenchida e consistia apenas da célula incidente.

Após correções, os valores das células previamente “rebaixadas” foram recuperadas conforme as estimativas do processo de interpolação. Este processo pode ser realizado com a aplicação de álgebra de mapas, aplicando-se máscaras binárias para a extração da altimetria do MDE e a reposição dos valores originais da drenagem no modelo corrigido. A Figura 5.5 mostra o MDE com os valores de calha recuperados, bem como com as depressões corrigidas.

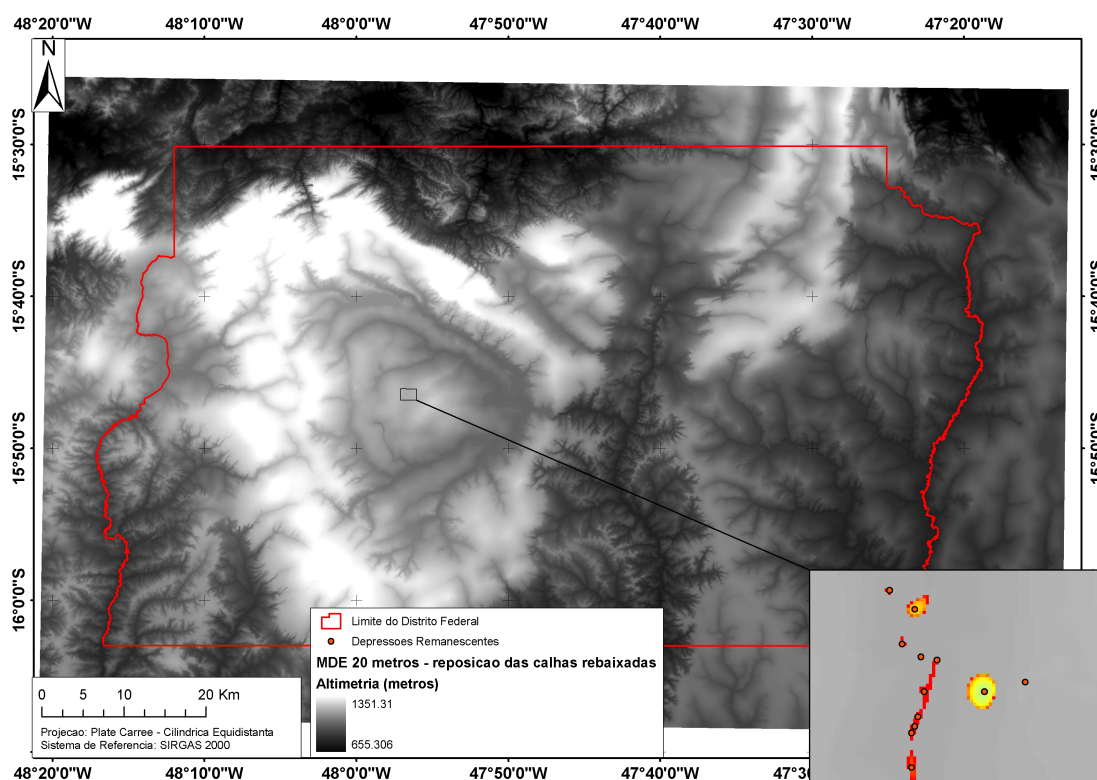
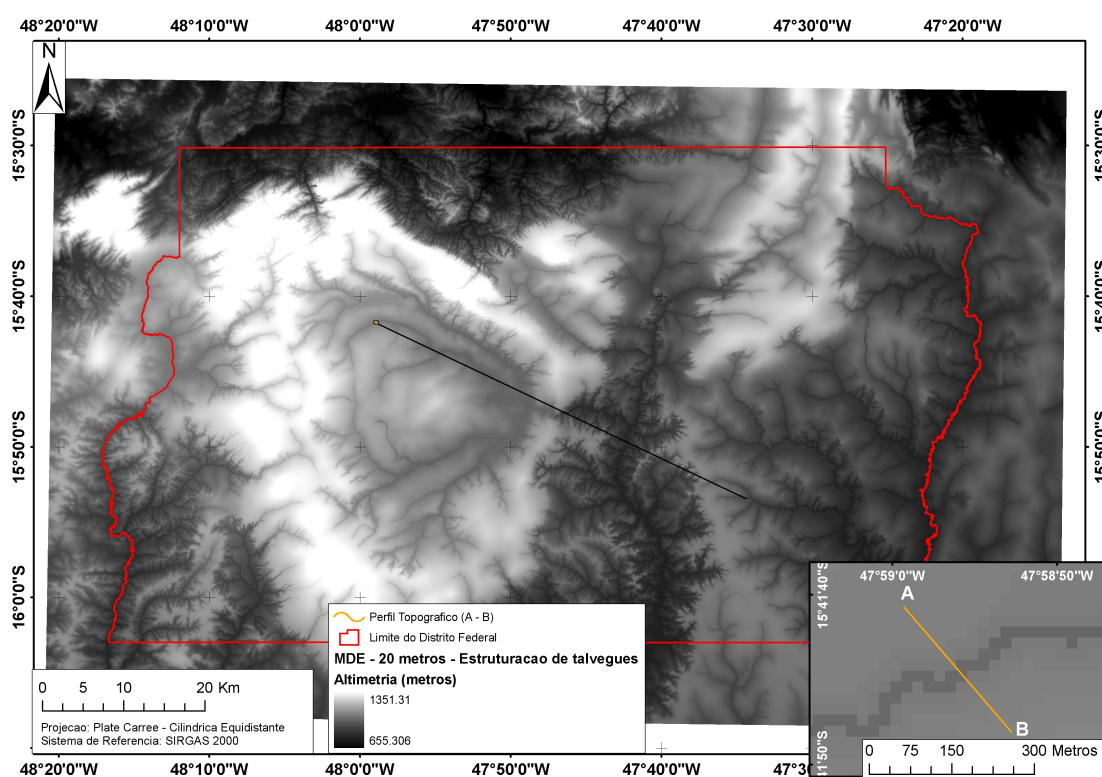


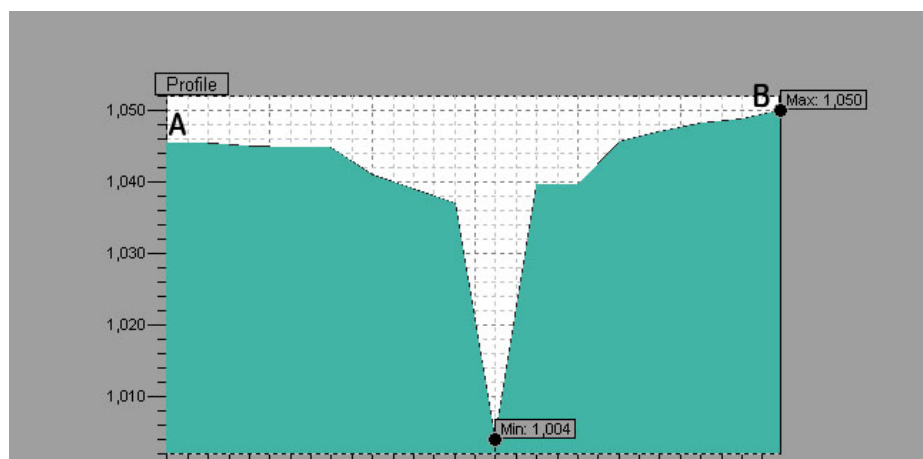
Figura 5.5 – MDE com as calhas recuperadas, por meio de álgebra de mapa, relativo aos valores altimétricos estimados na etapa de interpolação. Representação, em \log_{10} , dos locais cujas depressões foram ajustadas conforme o método proposto (coloração alaranjada).

Comparando-se o MDE original e este produto corrigido percebe-se que os valores de máximo e mínimo de altimetria mantiveram-se iguais, sendo que as diferenças altimétricas entre estes MDE's são relativas às depressões espúrias preenchidas que não correspondiam as células previamente “rebaixadas”. As depressões espúrias que, por ventura, se encontravam nessas mencionadas células foram corrigidas conforme a segunda aplicação do algoritmo *Fill Sinks*, procedimento descrito a seguir.

Finalmente, a estruturação dos talvegues pode ser realizada com a aplicação dos parâmetros conforme a metodologia proposta, com a finalidade da obtenção do MDEHC. Esta etapa consistiu da segunda utilização do algoritmo *Agree* sobre o modelo previamente corrigido, seguido da segunda aplicação do algoritmo *Fill Sinks* com a finalidade do preenchimento de depressões “espúrias” que podem vir a ser criadas na etapa de estruturação dos talvegues (DJOKIC, 2008). Vale lembrar que os talvegues aqui estruturados tiveram por base a hidrografia vetorial ajustada conforme descrito na etapa metodológica. A Figura 5.6 apresenta o MDEHC com os talvegues estruturados, após a segunda aplicação do algoritmo *Fill Sinks*.



(a)



(b)

Figura 5.6 – (a) MDEHC com os talvegues estruturados. (b) Perfil topográfico (A – B) de uma porção com talvegues.

A importância da estruturação de talvegues no MDE previamente corrigido consiste em garantir que o comportamento do escoamento superficial do modelo seja o mais fidedigno possível com a realidade mapeada no aerolevantamento fotogramétrico 1:10.000. A Figura 5.7 mostra a coincidência entre a drenagem numérica e a vetorial, após as etapas propostas de consistência hidrológica.

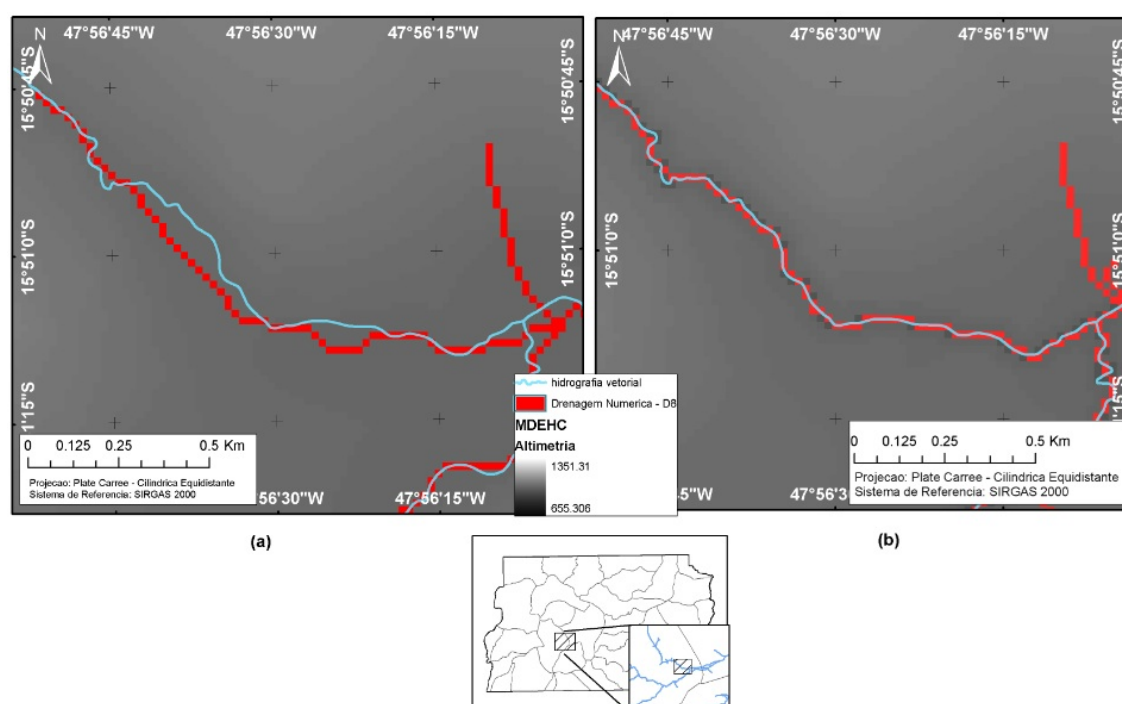


Figura 5.7 – Coincidência entre a drenagem vetorial (em cor azul) e a estimada no MDEHC gerado (em vermelho). (a) Estimativa da drenagem numérica sem a construção dos talvegues. (b) Estimativa da drenagem numérica com a construção dos talvegues.

Percebe-se que os locais com a presença dos talvegues apresentam uma melhor coincidência entre a drenagem derivada do modelo com relação a drenagem vetorial adotada como dado de entrada, se comparado as áreas aonde a drenagem obtida do modelo (em vermelho) foi estimada sem esta compatibilização de vertentes (Figura 5.7 b).

A extração aqui utilizada para derivação da drenagem obtida do MDEHC usa como parâmetro base o valor-limiar, determinado empiricamente pelo pesquisador, para discretizar as células que serão classificadas como “drenagem”, conforme descrito no capítulo IV. Isto explica a não compatibilização integral com a drenagem vetorial, como pode ser observado na Figura 5.7 (a) e Figura 5.7 (b) em locais com presença da drenagem numérica (em vermelho) porém sem a drenagem vetorial de referencia (em azul).

5.3. RESULTADOS DAS ESTIMATIVAS DAS ÁREAS DE CONTRIBUIÇÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO LAGO PARANOÁ – MÉTODO D8 E D_{∞} .

Neste momento serão apresentados e discutidos os resultados obtidos por meio da execução das etapas metodológicas propostas para a estimativa de áreas de contribuição utilizando o método D8 e o D_{∞} , com o intuito de extrair as 5 Unidades Hidrográficas – UH's referentes a bacia hidrográfica do Lago Paranoá. Estas estimativas foram realizadas, conforme discutido no capítulo IV, considerando o MDEHC com resolução espacial de 20 metros, bem como o MDEHC com resolução espacial de 7 metros referente à área-teste. O objetivo é verificar se o refinamento na qualidade e na acurácia espacial do modelo interfere na estimativa de área de contribuição, que por sua vez, será compartimentado nas pretendidas UH's.

Ambos os MDE's envolvidos neste teste metodológico foram interpolados utilizando o algoritmo TOPOGRID, com a parametrização mais adequada/ verificada no capítulo III. A Figura 5.8 apresenta o resultado das 5 (cinco) UH's extraídas utilizando o método D8 e D_{∞} , tanto no contexto do MDEHC de 20 metros como no MDEHC de 7 metros.

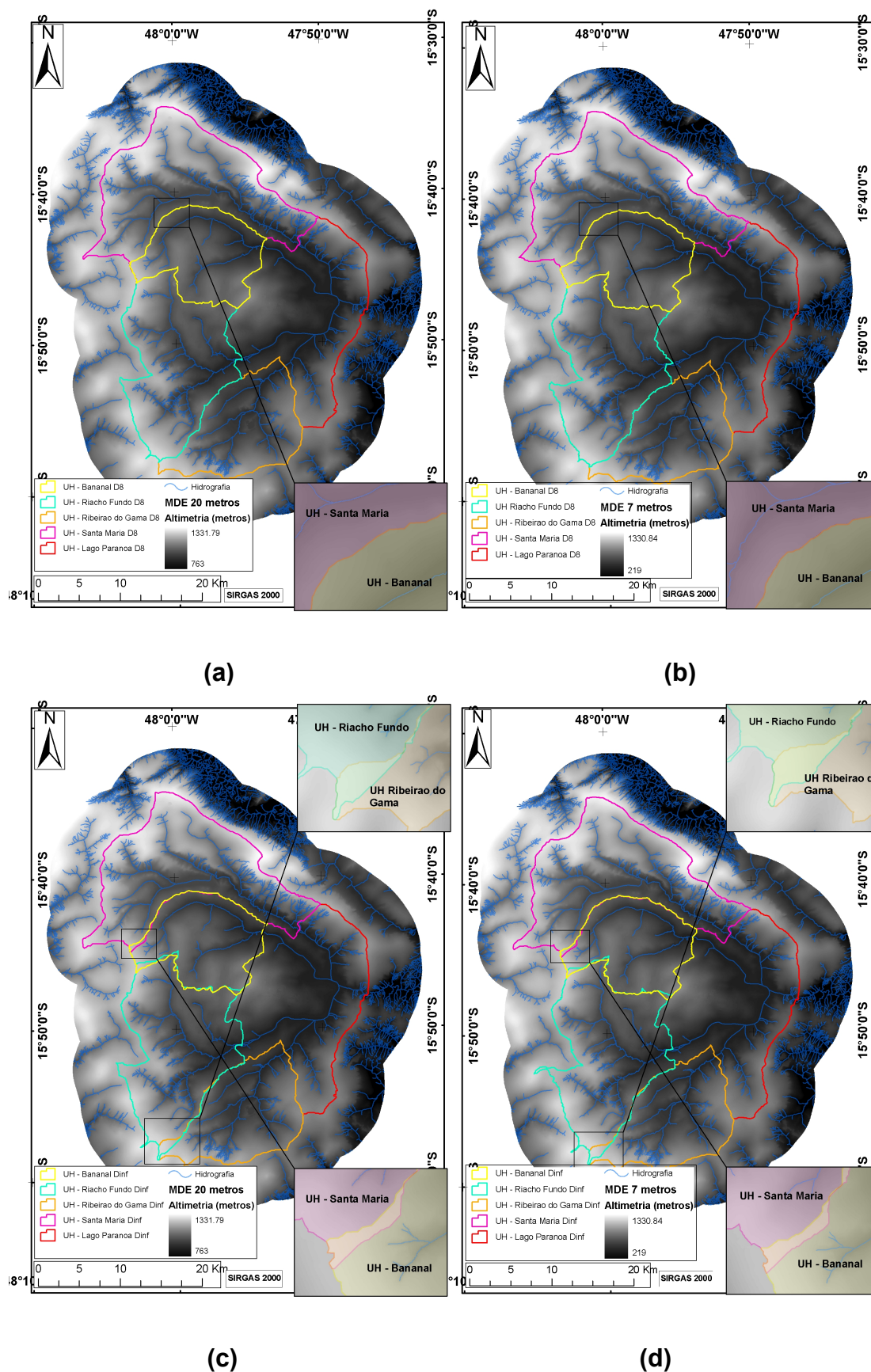


Figura 5.8 – Resultado obtido da estimativa das cinco UH's de interesse por meio do método D8 - (a) MDE 20 metros (b) MDE 7 metros, e do método D_{∞} - (c) MDE 20 metros (d) MDE 7 metros.

Pode ser observado, a partir dos resultados mostrados na Figura 5.8 (a) e (b), que o método D8 executa o traçado das áreas de contribuição sem que haja a interposição de áreas adjacentes, atendendo *a priori* os objetivos desta pesquisa.

Assim, foi possível entender o motivo pelo qual o método representou com a acurácia desejada os limites das UH's, uma vez que usa valores "absolutos" associados ao número de células a montante, cada qual com seu valor correspondente de área, eliminando assim a dispersão de fluxo no modelo. Esta é uma vantagem deste método com relação à extração de divisores d'água.

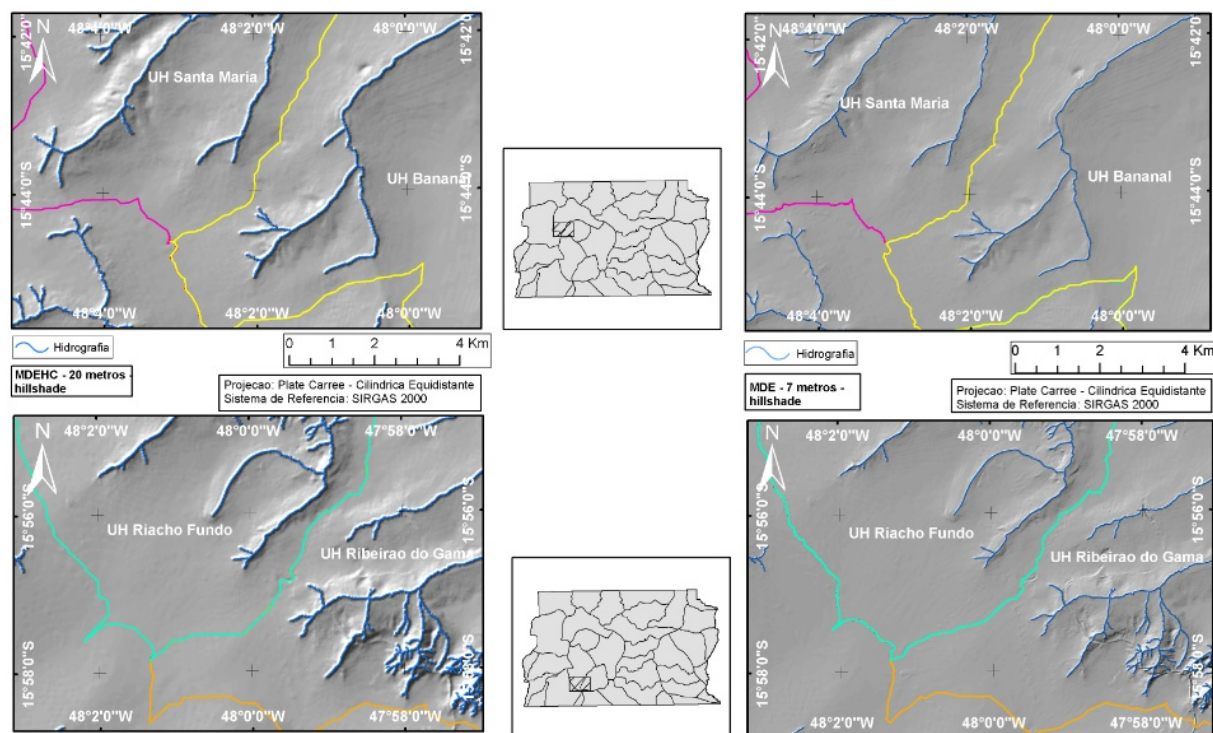
Com relação aos testes executados utilizando como base o método D^∞ (Figura 5.8 c e d) foram observados sobreposições entre áreas de contribuição adjacentes, o que pode inviabilizar o traçado acurado dos divisores d'água pretendidos. Essas sobreposições foram mais significativas entre os limites das UH's Santa Maria e Bananal, e entre as UH Riacho Fundo e UH Ribeirão do Gama.

O efeito constatado neste resultado está associado ao próprio método de acumulação de fluxo de área a montante, inerente ao D^∞ , na estimativa de área de contribuição. Segundo Tarboton (1997), diferente do método de única direção (D8), o método inerente a múltiplas direções considerando os oito triângulos para a estimativa de infinitas possibilidades de fluxo direcional utiliza o próprio pixel de referência acrescido de todos os pixels a montante que tenham certa fração de contribuição, estimada no cálculo direcional, para a derivação da área de contribuição. Assim, é próprio deste método a introdução de dispersão de fluxo no modelo, o que pode vir a ser interessante para alguns objetos de pesquisa.

Este quadro leva à conclusão que as sobreposições observadas entre áreas de contribuição adjacentes podem ser explicadas pela consideração de um mesmo pixel (normalmente em área de borda) na estimativa de UH's adjacentes, uma vez que o mesmo pode apresentar múltiplas contribuições introduzido pela dispersão observada neste método. Esta é uma desvantagem no caso do objeto de estudo da presente pesquisa.

Segundo Tarboton (1997), a dispersão é inconsistente com a definição física de área a montante (A) e área de contribuição ($a=A/L$), sendo importante, então, a minimização do efeito de dispersão quando o interesse de pesquisa é a estimativa de a .

Com relação à hipótese levantada de possível acurácia no traçado dos divisores d'água a partir dos refinamentos espaciais do MDEHC, não ficou constatado “ganhos” perceptíveis considerando os dois estudos de caso. A Figura 5.9 mostra a comparação entre as UH's estimadas, considerando o refinamento espacial do MDEHC.



(a)

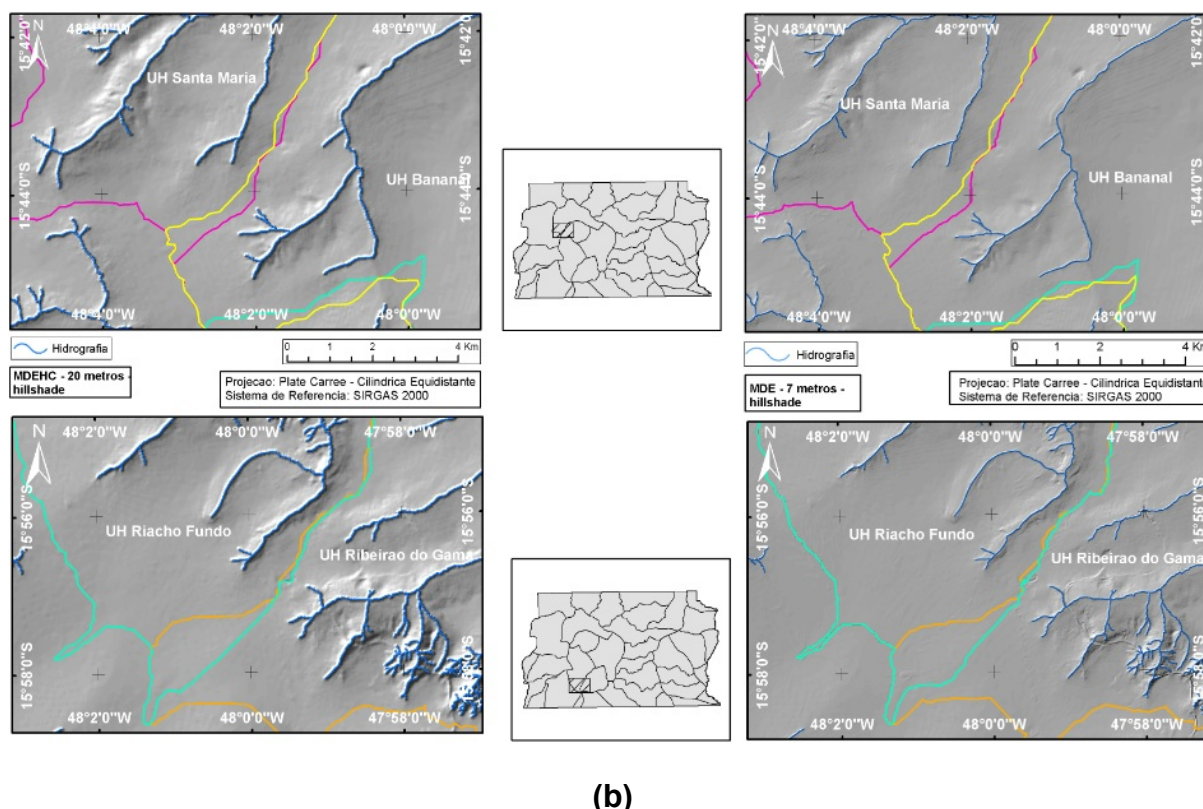


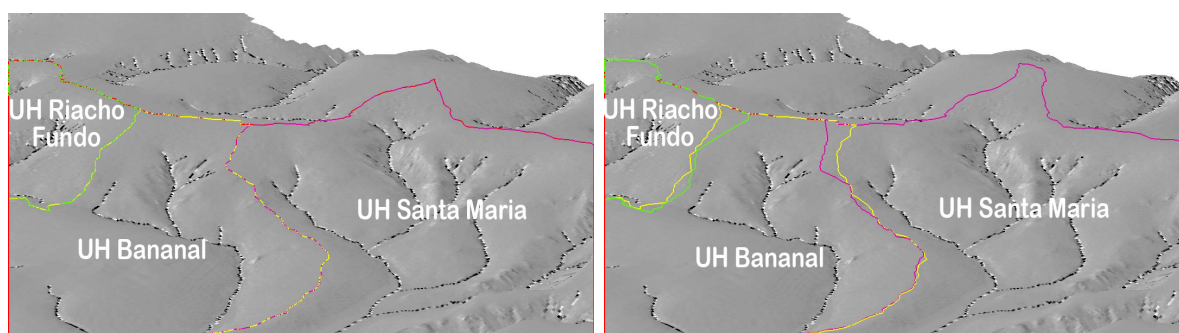
Figura 5.9 – (a) Comparação entre as UH's Santa Maria, Bananal, Riacho Fundo e Ribeirão do Gama, delimitadas a partir do método D8, conforme o refinamento da resolução espacial do MDEHC. **(b)** Comparação entre as UH's Santa Maria, Bananal, Riacho Fundo e Ribeirão do Gama, delimitadas a partir do método D^∞ , conforme o refinamento da resolução espacial do MDEHC.

Portanto, a partir dos resultados obtidos pela análise proposta na área-teste da bacia hidrográfica do Lago Paranoá, ficou constatado que para atender de forma mais acurada os propósitos desta presente pesquisa o método D8 apresentou melhores resultados se comparado ao método de múltiplas direções D^∞ .

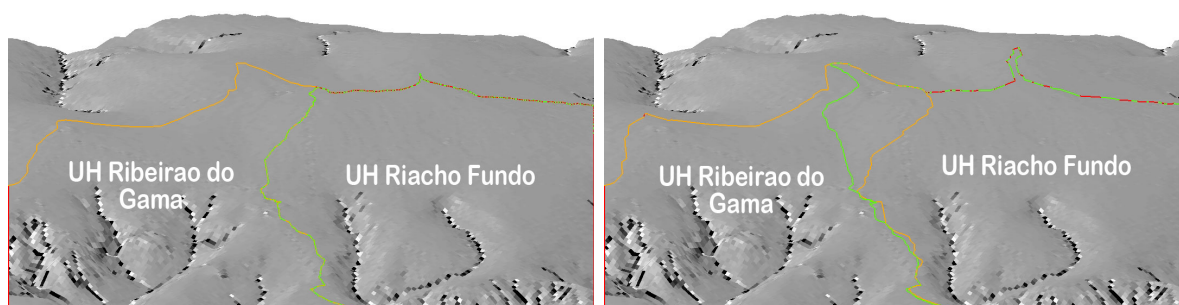
Vale ressaltar que mesmo com os resultados acima mencionados, o método D^∞ é um importante algoritmo que foi desenvolvido para outros tipos de objetos de pesquisa, que necessitem da dispersão do fluxo superficial em suas etapas metodológicas, tais como os estudos vinculados a determinação de áreas susceptíveis a movimentos de massa, dispersão de poluentes, entre outros.

A operacionalização computacional desses dois métodos se encontra no algoritmo *TauDEM*, onde fica claro, considerando o *workflow* do aplicativo, a utilização do modelo de direção e acumulação de fluxo D8 para o objetivo específico de delimitação física de áreas de contribuição. A Figura 5.10 mostra a sobreposição

entre as UH's, definidas pelo método D8 e D_{∞} , numa perspectiva tridimensional, considerando o MDEHC de 7 metros de resolução espacial.



(a)



(b)

Figura 5.10 – (a) Limites entre as UH's Santa Maria, Bananal e Riacho Fundo, considerando a estimativa utilizando o método D8 (esquerda) e D_{∞} (direita). **(b)** Limites entre as UH's Riacho Fundo e Ribeirão do Gama, considerando a estimativa utilizando o método D8 (esquerda) e D_{∞} (direita).

5.4. RESULTADO DA AVALIAÇÃO ALTIMÉTRICA DO MDEHC ELABORADO PARA O DISTRITO FEDERAL

Segundo o método proposto de validação altimétrica apresentada no capítulo IV, o modelo elaborado deve ser representativo altimetricamente para ser usado na derivação dos traçados dos divisores d'água de cada uma das 36 unidades hidrográficas de interesse desta pesquisa. Por conseguinte, foram utilizados os 276 pontos de controle selecionados anteriormente (Figura 4.2) para a estimativa do EMQ e a identificação da respectiva classe, conforme padronização do Decreto nº 89.817/84. A Tabela 5.1 mostra o resultado encontrado na etapa de validação altimétrica do MDEHC gerado, apresentando o EMQ, a média, bem como os valores mínimos e máximos, em metros, da diferença altimétrica entre os pontos de controle e o MDEHC do DF.

Tabela 5.1 – (a) Limiares de validação altimétrica presente nas Normas Técnicas da Cartografia Brasileira – Decreto n 89.817/84 – correspondente a escala 1:100.000 (equidistância de 50 metros). **(b)** Valores encontrados a partir da aplicação da metodologia de validação proposta

Classe	PEC	EP
A	25	16,5
B	30	20
C	37,5	25

(a)

	EMQ (metros)	Mínimo (metros)	Máximo (metros)
Equidistância de 50 metros (276 pontos de controle)	3,32	0	19,01

(b)

Aplicando os limiares pré-estabelecidos pelo Decreto n° 89.817/84, o resultado encontrado foi de **3,32** metros de EMQ considerando os 276 pontos de controle e o valor altimétrico estimado no MDEHC. Estes valores estão dentro do limite de tolerância da EP da classe A, sendo que 100% de seus valores estão abaixo do PEC A.

Os valores encontrados nesta etapa de validação mostram que o MDEHC foi bem estimado principalmente devido ao uso de dados altimétricos vetoriais de entrada da escala 1:10.000, que foram degradados devido, principalmente, a compatibilização à escala 1:100.000, equivalente ao mapeamento das unidades hidrográficas do DF realizado pela SEMATEC/CODEPLAN.

Porém a análise dos valores de diferença altimétrica de máximo e mínimo encontrados, apesar de estarem abaixo do limiar de aceitação da classe A (PEC A – 25 metros) presente na norma acima citada, mostra uma amplitude considerável entre os dados amostrais, variando de 0 a 19 metros. A Figura 5.11 apresenta um gráfico de dispersão dos dados, estruturado em y com os valores de diferença altimétrica encontrada na nuvem amostral.

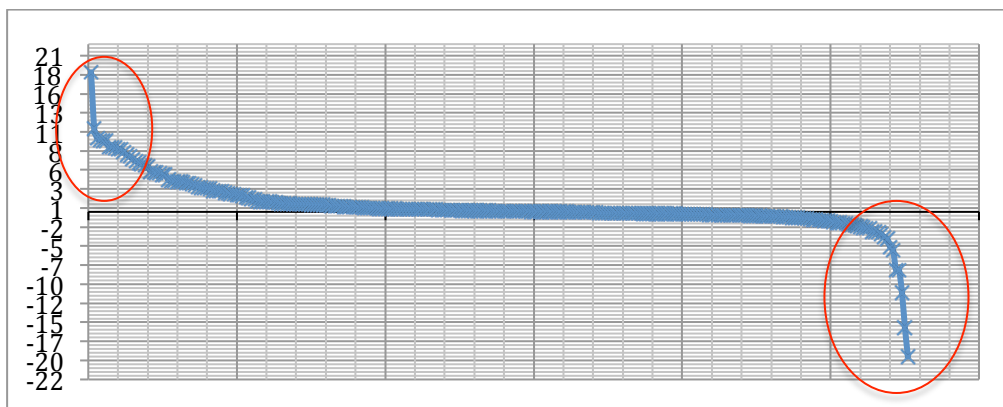


Figura 5.11 – Gráfico de dispersão dos valores de diferença encontrados entre os pontos amostrados. O Gráfico está sequenciado das maiores as menores diferenças altimétrica, valores representados no eixo y. Em cor vermelha os valores encontrados com as maiores diferenças.

Pode-se perceber que a disposição sequenciada dos dados, do maior ao menor valor, se encontra basicamente próxima ao eixo x, apresentando valores discrepantes nas duas extremidades do gráfico (em cor vermelha). Estes pontos amostrais correspondem a 10,8% do total amostrado, relativo a 30 pontos de referência. Estas excepcionalidades, que apresentam as maiores diferenças encontradas, sejam positivas (subestimativa do MDEHC) ou negativas (sobrestimava do MDEHC) estão presentes nos extremos do gráfico apresentado e estão localizadas em regiões de relevo dissecado, com presença de alta variação altimétrica, ou próxima a canais de drenagem. A Figura 5.12 mostra a localização espacial dos pontos de controle que apresentaram maiores valores absolutos relativos à diferença altimétrica dentre a nuvem amostral adotada.

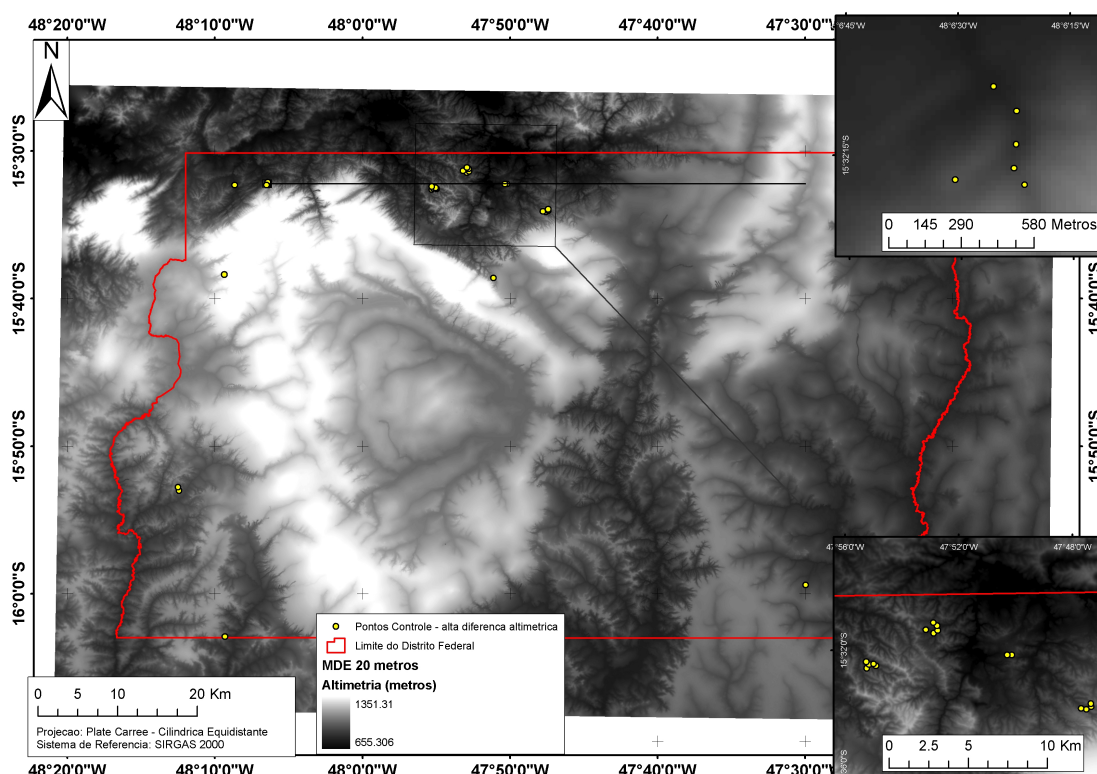


Figura 5.12 – Mostra os pontos de controle que apresentaram valores mais elevados com relação à diferença altimétrica dentre a nuvem amostral seleccionada.

Estes valores mais elevados podem ser explicados pela própria localização destes pontos “excepcionais” no contexto da área modelada. Os que estão inseridos em regiões de relevo dissecado, com elevada presença de dados altimétricos, podem ser explicados pela dificuldade enfrentada pelo interpolador ao estimar os dados altimétricos após a degradação para os referidos 20 metros de resolução espacial. Já os pontos amostrais próximos às calhas de drenagem, acredita-se que os valores elevados de diferença altimétrica estejam associados aos talwegues estruturados na etapa de consistência hidrológica.

5.5. DELIMITAÇÃO DAS 36 UNIDADES HIDROGRÁFICAS E A COMPARAÇÃO COM O MAPEAMENTO *UNIDADES HIDROGRÁFICAS DO DISTRITO FEDERAL (SEMATEC/CODEPLAN)*

Seguindo o fluxograma metodológico apresentado no capítulo III (Figura XX), foi possível derivar o modelo direcional de fluxo a partir do MDEHC previamente construído. A Figura 5.13 mostra o modelo de direção de fluxo delimitado segundo a metodologia apresentada.

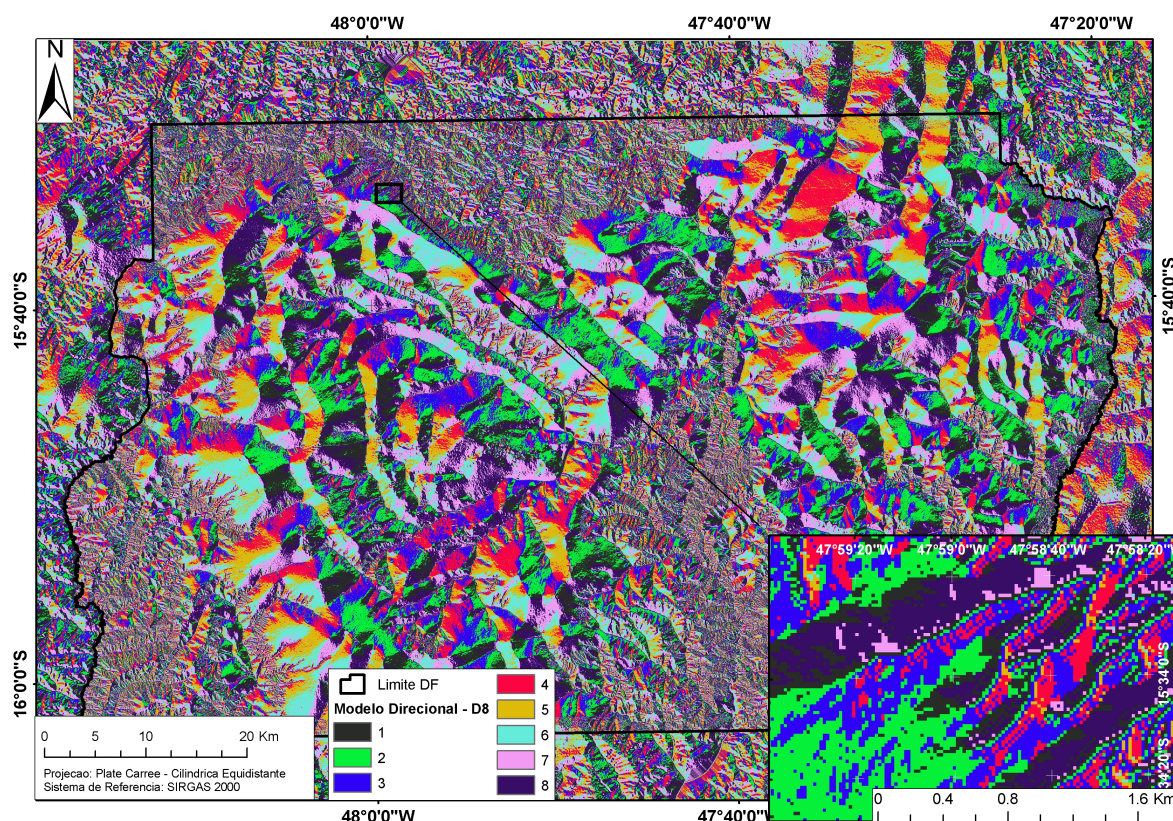


Figura 5.13 – Mostra o modelo de direção de fluxo derivado do MDEHC elaborado para o contexto espacial do Distrito Federal.

Pode-se perceber que esse processo de modelagem apresenta a realidade correspondente a direção preferencial de escoamento superficial da água em 8 classes pré-estabelecidas pelo algoritmo. Apesar das limitações inerentes a simplificação proporcionada pela metodologia D8, esse é o mais indicado para os objetivos dessa pesquisa, visto os resultados já discutidos na comparação do método D8 e D_{∞} .

O produto subsequente é o modelo de acumulação de fluxo, resultado derivado do modelo de direção preferencial de fluxo. Nesse as células com um elevado número absoluto possuem áreas de contribuição maiores se comparados com células localizadas em regiões com maior altimetria, tais como topos de morros. A Figura 5.14 mostra (em \log_{10}) o resultado do fluxo acumulado do modelo direcional para o contexto do Distrito Federal, bem como a relação entre os valores encontrados e a altimetria do terreno.

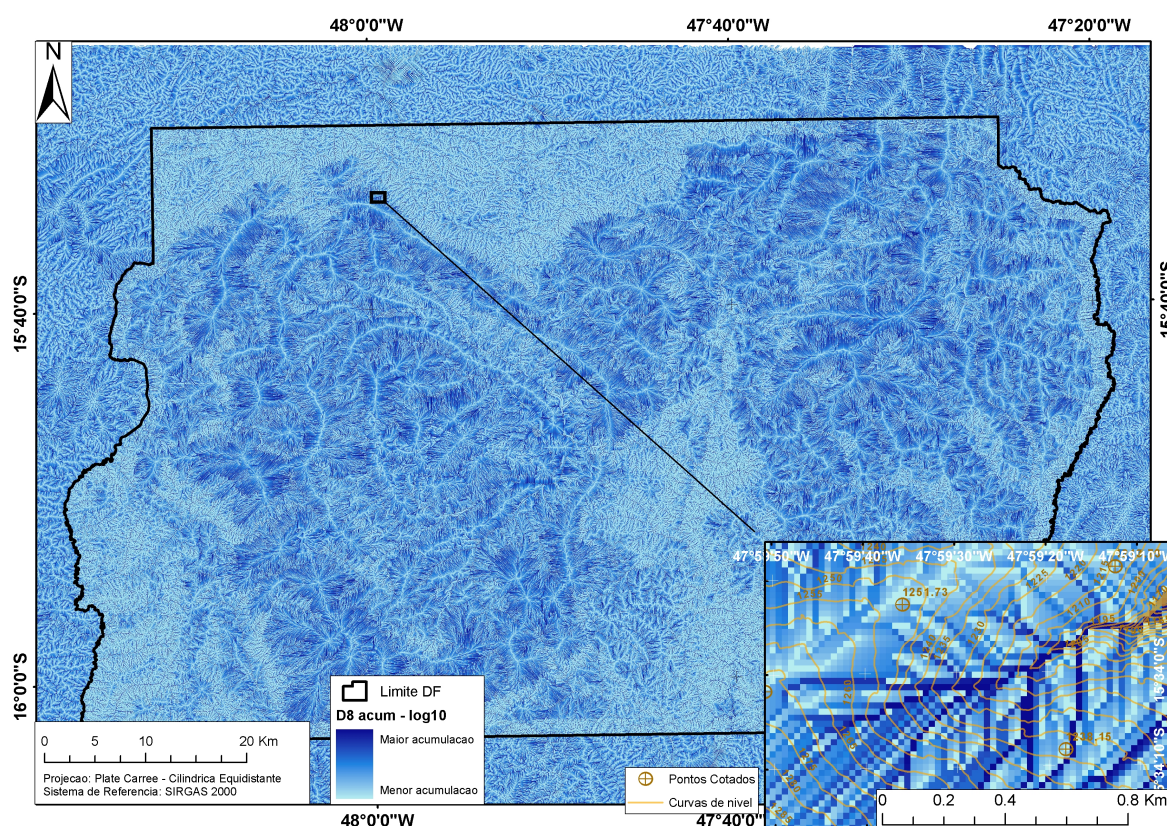
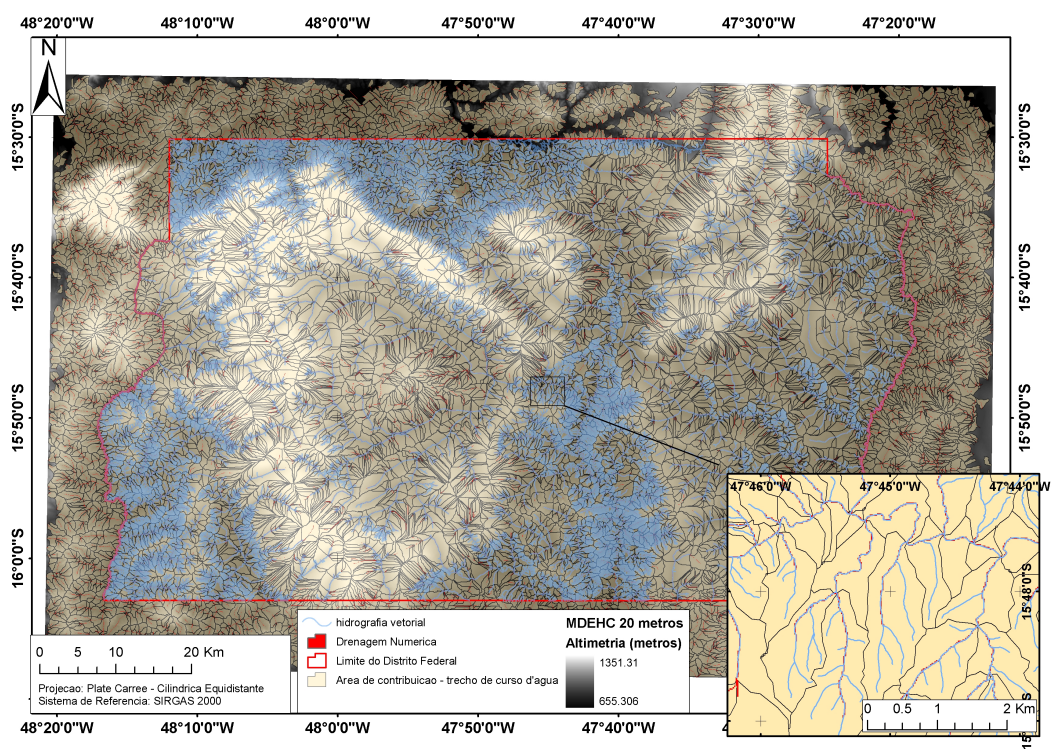
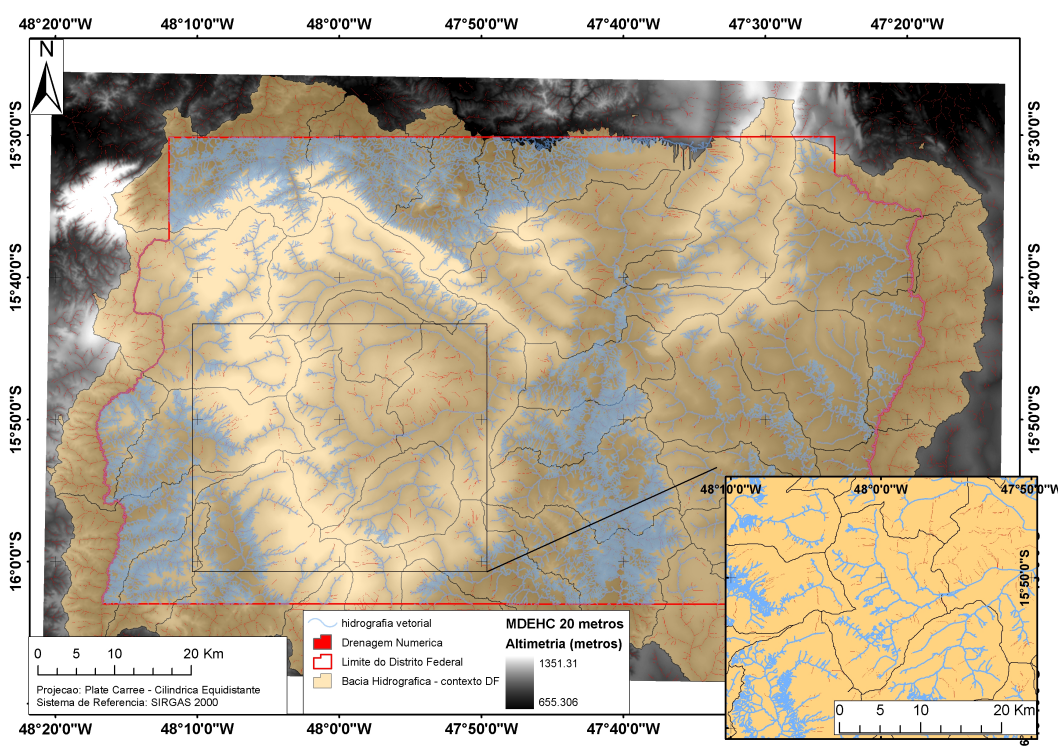


Figura 5.14 – Apresenta o modelo de acumulação de fluxo (\log_{10}) referente a área de abrangência do DF, bem como a relação entre os valores derivados e as altimetria.

Após a estimativa das acumulações de fluxo em cada célula do modelo, foi possível delimitar as bacias hidrográficas considerando os exutórios das 36 UH's pré-definidas seguindo os passos metodológicos presente no algoritmo *TauDEM* e apresentados em detalhes no capítulo anterior. A Figura 5.15 mostra as áreas de drenagem derivadas do modelo de fluxo acumulado, bem como os ajustes vetoriais realizados para compartimentar as bacias hidrográficas, num primeiro momento, e subsequentemente as 36 UH's de interesse.



(a)



(b)

Figura 5.15 – (a) Mostra as áreas de drenagem de cada trecho de curso d'água derivado do MDEHC; **(b)** Ajustes e compartimentações vetoriais em bacias hidrográficas, conforme as Unidades Hidrográficas.

A partir da compartimentação vetorial realizada nas áreas de drenagem (Figura 5.15 a e b), conforme a morfometria das UH's de referência, foi possível reduzir significativamente o quantitativo de áreas de drenagem, que consequentemente aproximou mais os produtos extraídos do objetivo geral desta pesquisa.

As 36 Unidades Hidrográficas (UH's) delimitadas com base no MDEHC foram possíveis com a compatibilização das bacias hidrográficas e a agregação das informações presentes conforme o mapa de referência da pesquisa. A Figura 5.16 mostra o resultado alcançado com as etapas metodológicas propostas e a delimitação das UH's no contexto do DF.

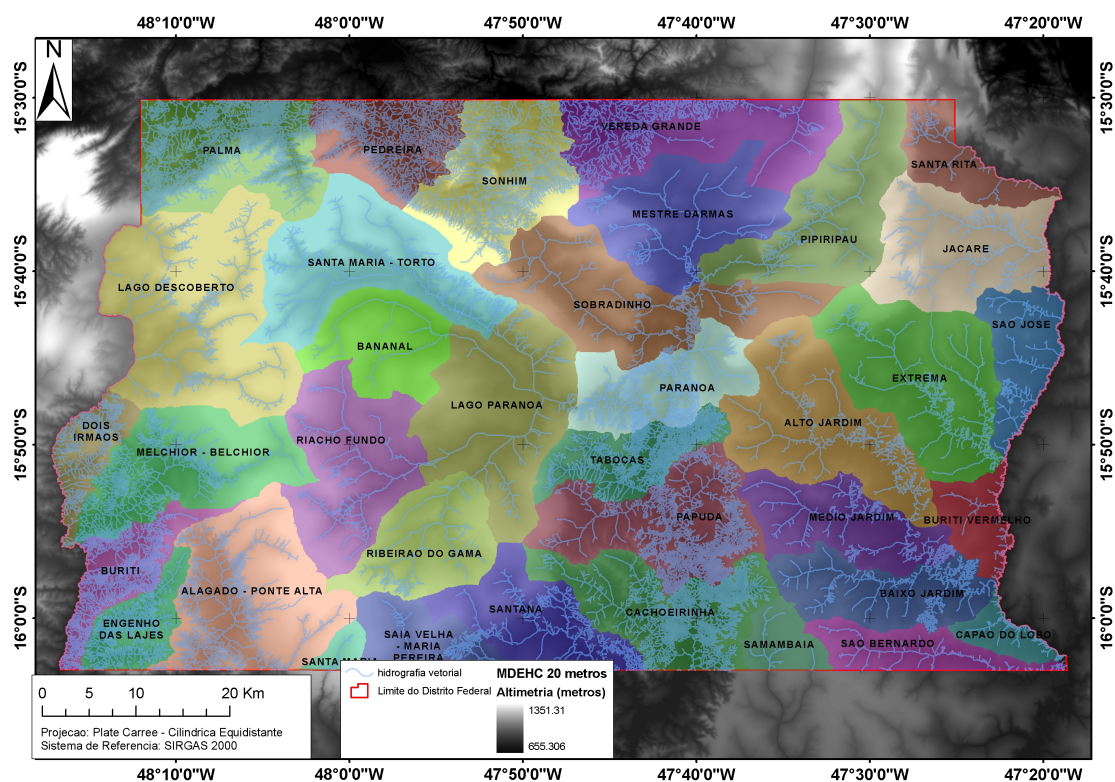


Figura 5.16 – Resultado das 36 UH's delimitadas com base no MDEHC elaborado.

Ao se comparar os quantitativos referentes as áreas das 36 UH's do mapeamento de referência junto ao produto delimitado conforme metodologia proposta ficou claro que existem discrepâncias entre os valores, resultado das divergências morfométricas entre os elementos comparados. A Tabela 5.2 mostra o quantitativo relativo as áreas entre as UH's referentes ao mapeamento da SEMATEC/CODEPLAN e as delimitadas, utilizando por base o MDEHC.

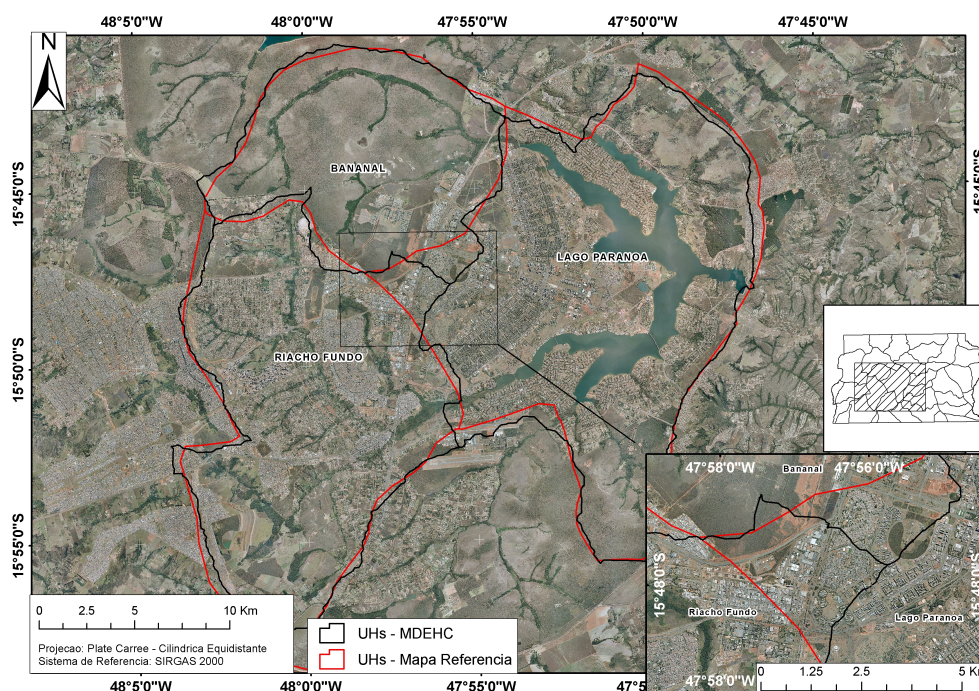
Tabela 5.2 – Diferença entre os valores de área comparando-se as UH's do mapeamento de referência e os estimados utilizando o MDEHC.

Unidades Hidrográficas - Uhs	Área (Km ²) - Mapeamento de Referência - SEMATEC/CODEPLAN	Área (Km ²) - Delimitação utilizando o MDEHC elaborado	Diferença (Km ²)	Diferença (%)
Alagado/ Ponte Alta	259,06	258,18	0,88	0,34
Alto Jardim	237,07	243,55	6,48	2,66
Baixo Jardim	149,46	141,52	7,94	5,31
Bananal	123,39	130,16	6,77	5,20
Buriti	93,51	92,83	0,68	0,73
Buriti Vermelho	54,40	60,02	5,62	9,37
Cachoeirinha	202,74	193,09	9,65	4,76
Capão do Lobo	40,18	36,67	3,51	8,73
Dois Irmãos	61,91	63,81	1,90	2,97
Engenho das Lajes	70,22	74,83	4,61	6,16
Extrema	240,48	252,98	12,49	4,94
Jacaré	198,58	198,52	0,06	0,03
Lago Descoberto	356,09	356,70	0,61	0,17
Lago Paranoá	279,22	264,14	15,08	5,40
Médio Jardim	153,51	144,73	8,78	5,72
Melchior/ Belchior	209,69	208,42	1,27	0,60
Mestre Darmas	216,45	200,21	16,24	7,50
Palma	213,60	208,14	5,46	2,56
Papuda	196,57	210,86	14,29	6,78
Paranoá	137,00	141,66	4,66	3,29
Pedreira	140,07	132,63	7,44	5,31
Pipiripau	217,77	210,78	6,98	3,21
Riacho Fundo	217,88	214,58	3,31	1,52
Ribeirão do Gama	141,20	143,14	1,94	1,35
Saia Velha/ Maria Pereira	96,27	92,40	3,87	4,02
Samambaia	52,24	48,71	3,53	6,75
Santa Maria	21,40	19,47	1,94	9,05
Santa Maria/ Torto	243,03	245,74	2,71	1,10
Santa Rita	77,29	80,03	2,74	3,43
Santana	146,96	145,56	1,40	0,95
São Bernardo	80,48	83,55	3,07	3,67
São José	93,82	95,14	1,33	1,40
Sobradinho	254,25	256,28	2,03	0,79
Sonhim	206,92	203,92	3,00	1,45
Tabocas	111,21	105,74	5,47	4,92
Vereda Grande	207,88	211,18	3,30	1,56

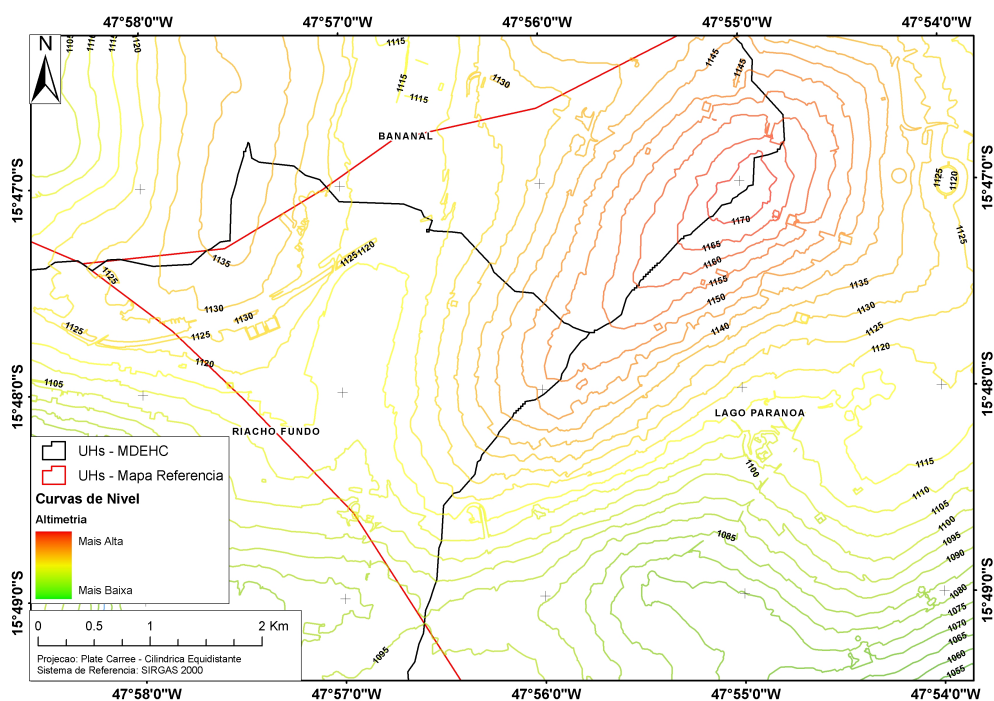
Diferenças foram observadas entre as áreas das UH's, cujo valor médio absoluto calculado foi de 5,03 Km². Outro índice calculado foi a média da variação relativa, que apresentou o valor de 3,71%. Esses índices indicam que a variação média encontrada é considerada baixa se comparada a magnitude das áreas em análise.

Porém apenas as estimativas considerando as áreas dos polígonos não refletem mudanças referentes a forma, visto que formas poligonais diferentes podem ter o mesmo valor de área. Após uma análise visual dos resultados, ficaram constatadas discrepâncias nos traçados das UH's, em algumas porções do território.

A Figura 5.17 apresenta essa constatação nos limites entre a UH do Riacho Fundo, a UH do Lago Paranoá e a UH do Bananal.



(a)

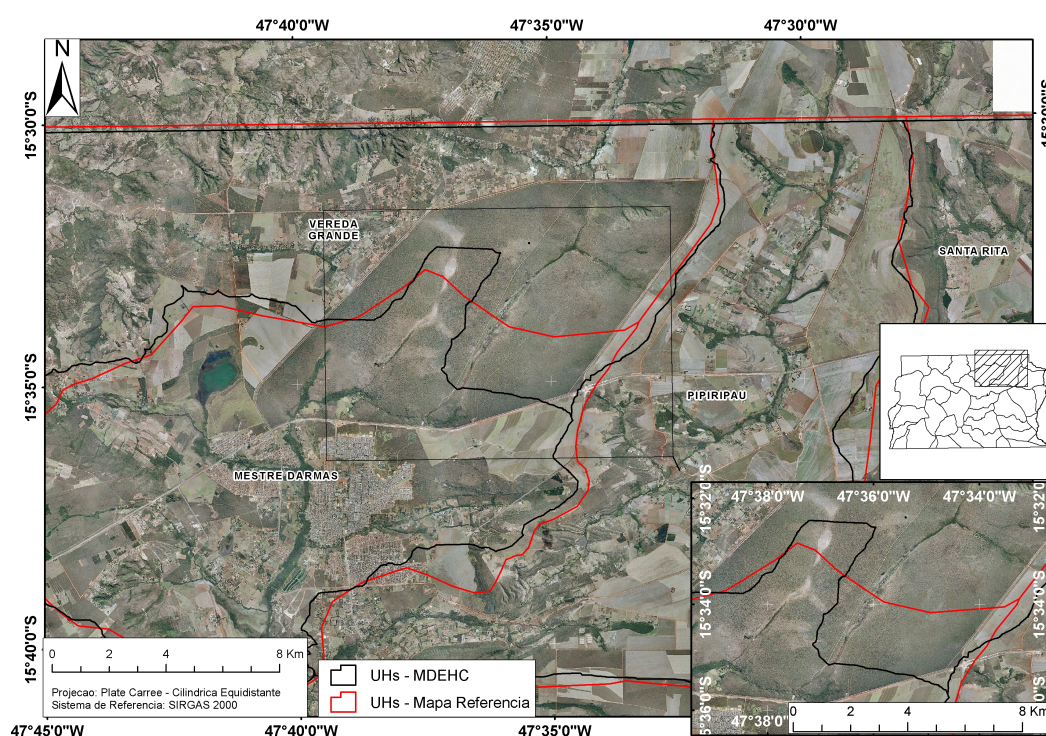


(b)

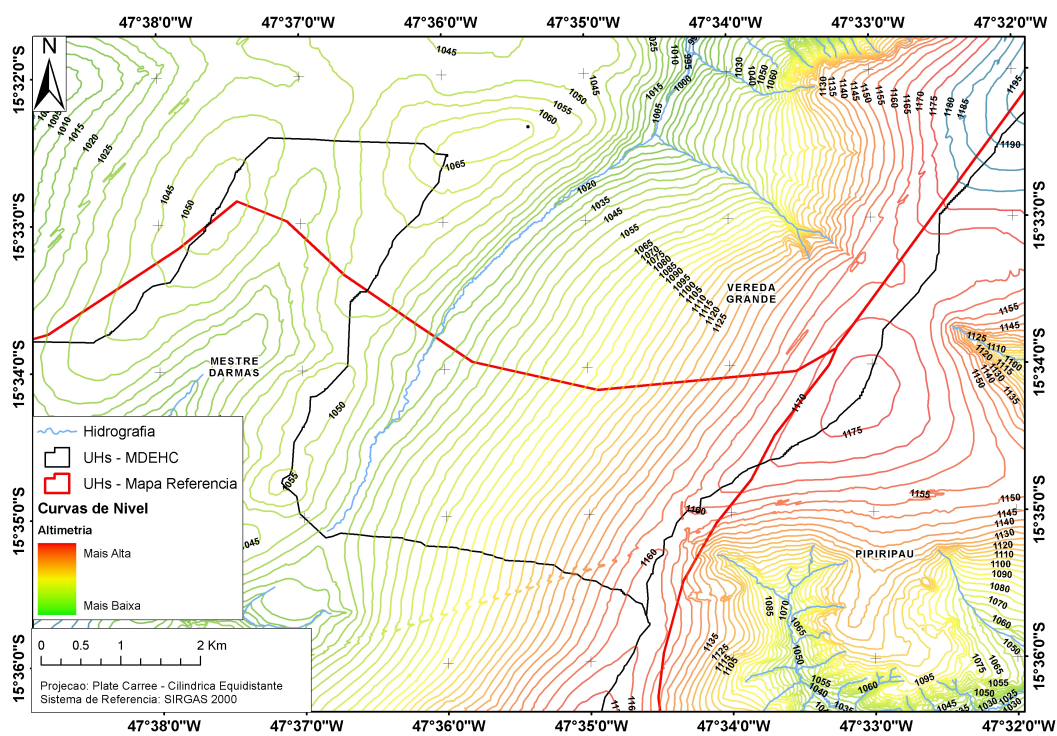
Figura 5.17 – (a) Mostra a discrepância nos traçados dos divisores d'água entre as UH's do Lago Paranoá, Riacho Fundo e Bananal. Base: Ortofoto do levantamento da

TERRACAP. **(b)** Mostra a respectiva área sobreposta aos vetores de curva de nível e pontos cotados.

Percebe-se que o traçado delimitado com base no MDEHC é condizente com os dados vetoriais relativos as curvas de nível 1:10.000 do levantamento da Terracap, e bem discrepante do tradicional traçado das mesmas UH's, considerando o polígono produzido pelo mapeamento de referência. Outros exemplos observados, no Distrito Federal, mostram também discrepâncias morfométricas entre o traçado das UH's. As Figuras 5.18 e 5.19 mostram outros pontos no DF com diferenças observadas entre os traçados dos divisores d'água.

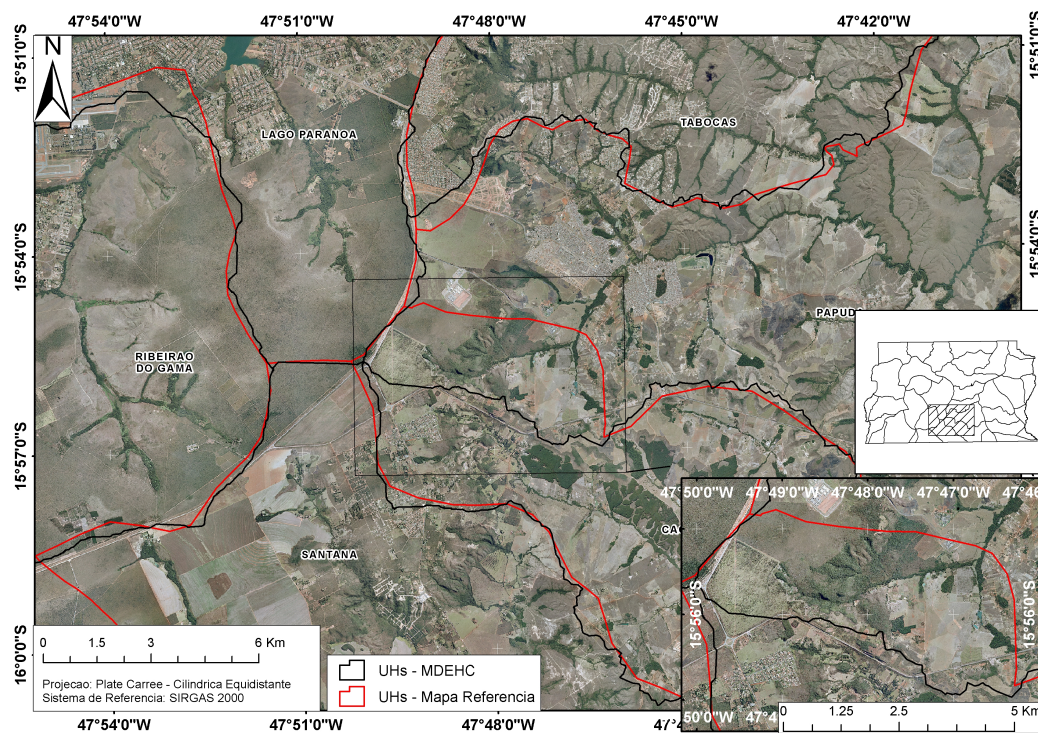


(a)

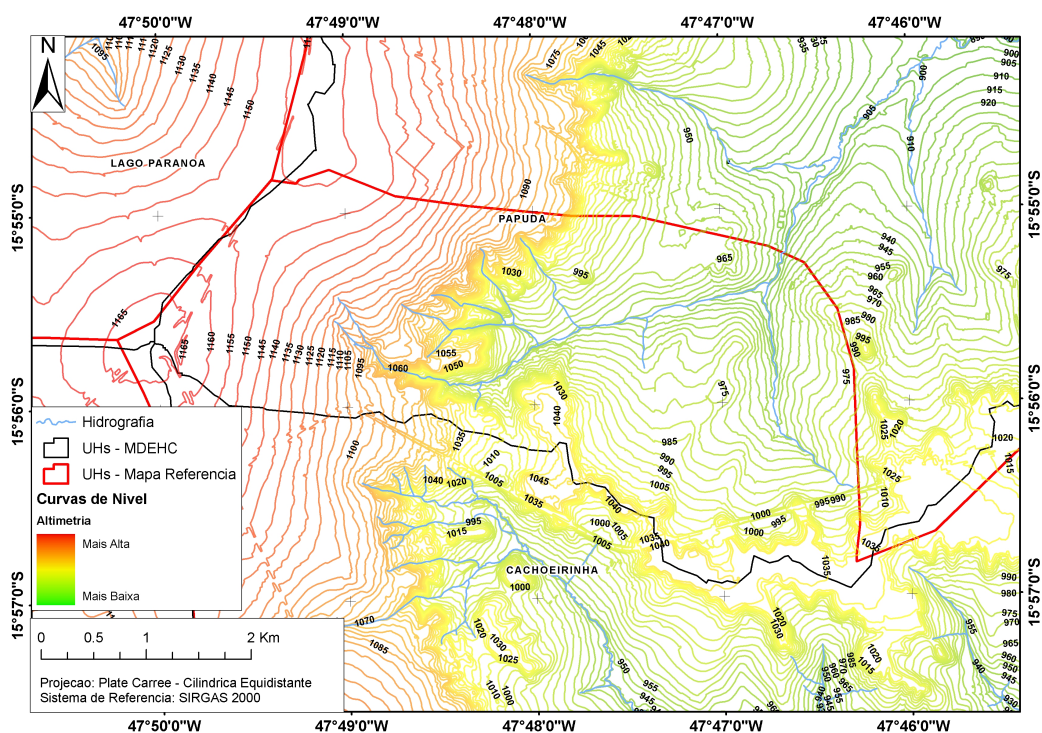


(b)

Figura 5.18 – (a) Outro ponto com discrepância identificado entre os limites das UH's Vereda Grande, Mestre D'Armas e Pipiripau. **(b)** Comparação desta área com os vetores de curvas de nível utilizados na modelagem.



(a)

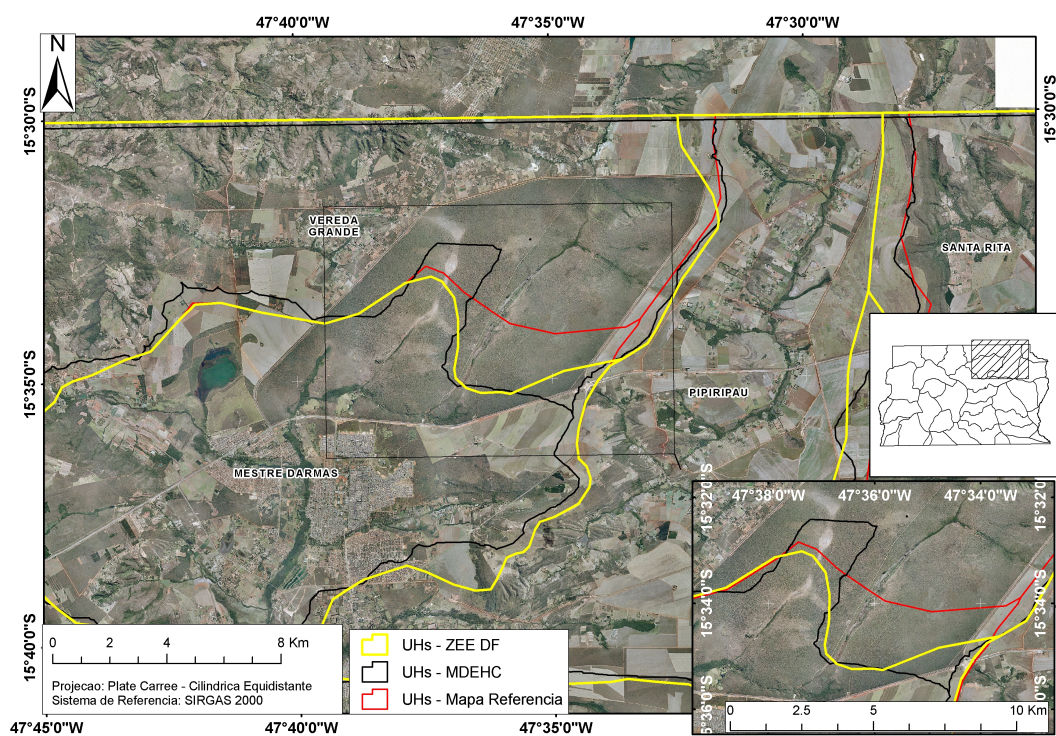


(b)

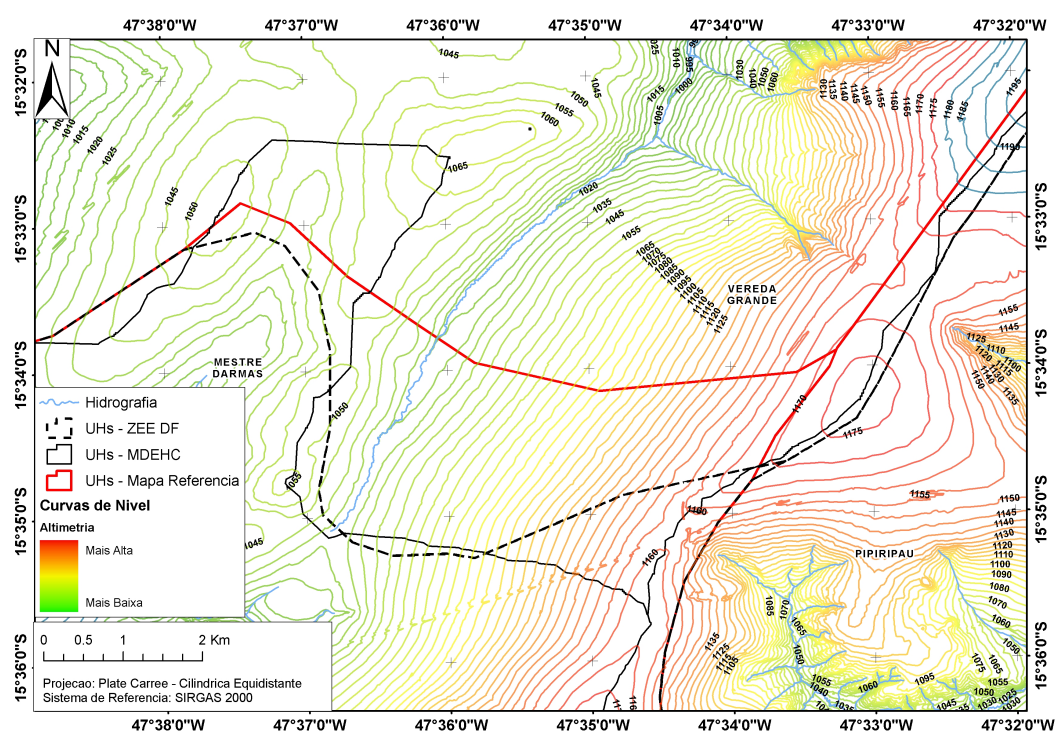
Figura 5.19 – (a) Outro ponto de discrepância observado entre as UH's do Lago Paranoá, Papuda, Cachoeirinha e Santana. **(b)** Comparação desta área identificada com os vetores de curva de nível 1:10.000.

Estas observações mostram que existem incongruências, em alguns pontos, no traçado das 36 UH's apresentadas pelo mapeamento de referência. Essas diferenças morfométricas podem causar variações consideráveis em cálculos de parâmetros e variáveis hidrológicas utilizadas para a gestão dos recursos hídricos do Distrito Federal.

Atualmente, o conceito de “Unidades Hidrográfica” foi resgatado no processo de Zoneamento Ecológico-Econômico do Distrito Federal, realizado na escala de referência de 1:100.000, e para as áreas especiais 1:25.000 (BRASIL, ZEE/DF, 2012). A definição e delimitação das mesmas 36 UH's adotada nesse processo de ordenamento territorial é bem semelhante às poligonais delineadas a época do mapeamento da SEMATEC/CODEPLAN de 1994. Porém algumas diferenças podem ser observadas, aproximando as mesmas das UH's derivadas nesse trabalho de pesquisa. A Figura 5.20 e 5.21 apresenta as mesmas localidades já consideradas acima, mostrando o ajuste das UH's utilizadas no ZEE do DF ao comportamento morfométrico do terreno.



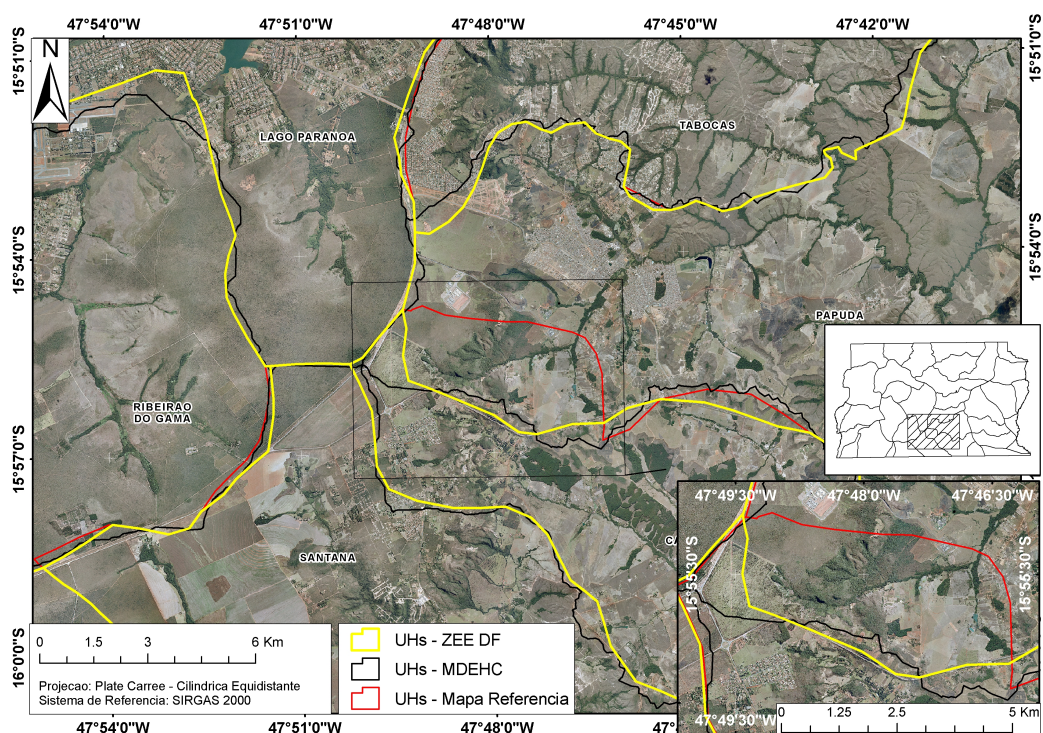
(a)



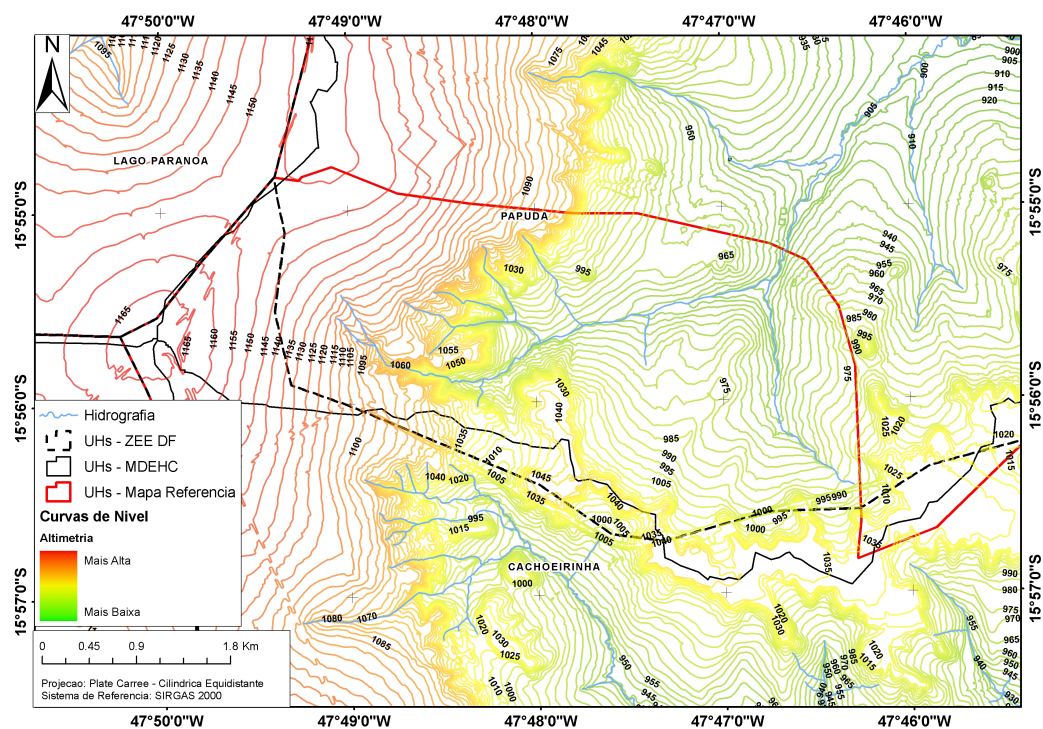
(b)

Figura 5.20 – Mostra a comparação entre os traçados das UH's do mapa de referência de 1994, do ZEE/DF e as derivadas por modelagem, no limite de Vereda Grande, Mestre D'Armas e Pipiripau. (a) Ponto com discrepância identificada entre

os limites das UH's Vereda Grande, Mestre D'Armas e Pípiripau. **(b)** Comparação desta área com os vetores de curvas de nível utilizados na modelagem.



(a)



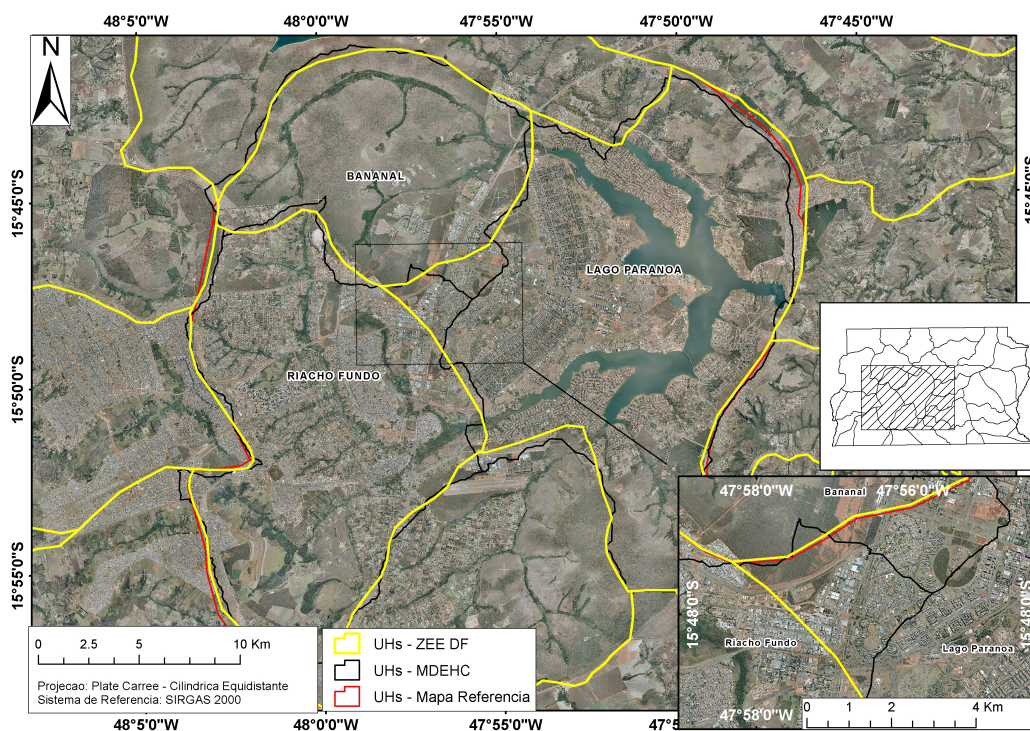
(b)

Figura 5.21 – Mostra a comparação entre os traçados das UH's do mapa de referência de 1994, do ZEE/DF e as derivadas por modelagem, no limite do Lago

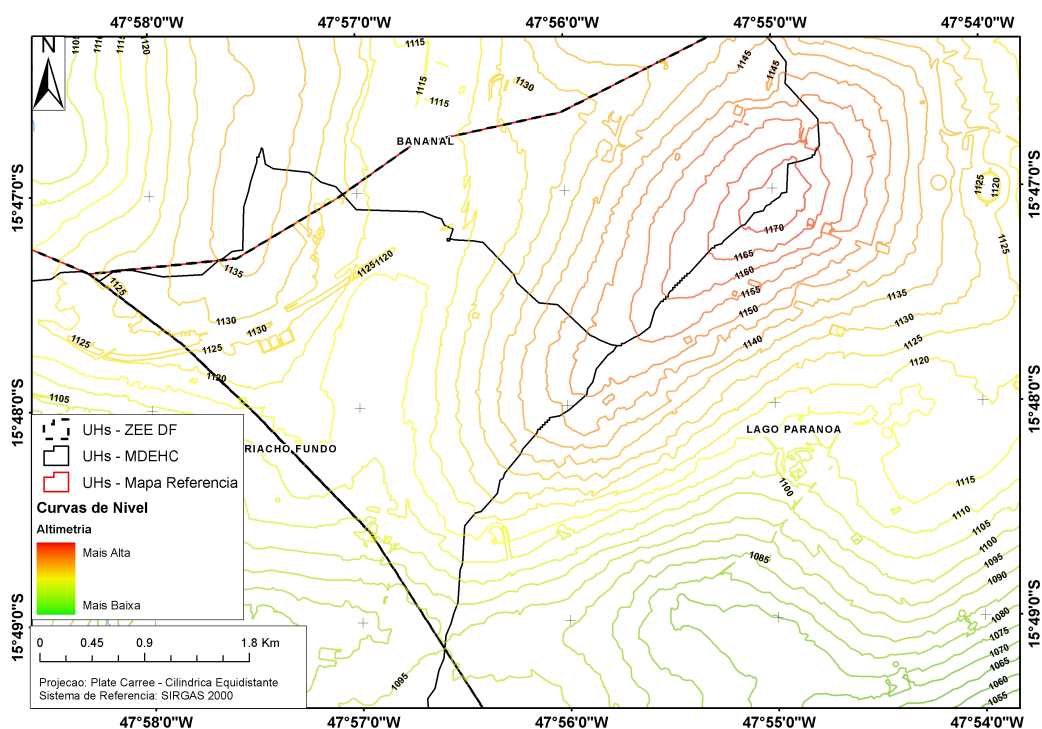
Paranoá, Papuda, Cachoeirinha e Santana. **(a)** Ponto com discrepância identificada entre os limites das UH's do Lago Paranoá, Papuda, Cachoeirinha e Santana. **(b)** Comparação desta área com os vetores de curvas de nível utilizados na modelagem

Pode-se observar, na figura acima, que os divisores d'água entre as UH's do Lago Paranoá, Papuda, Cachoeirinha e Santana, e, por sua vez, os divisores d'água entre as UH's Vereda Grande, Mestre D'Armas e Píripau foram ajustadas e estão delineados conforme os resultados alcançados pela metodologia proposta, o que reforça a importância da modelagem altimétrica para a temática de métricas relativa ao ganho de acurácia nas Unidades Hidrográficas.

Entretanto, ao analisar o ponto de discrepância na localidade nordeste da UH Riacho Fundo, limite com as UH's Lago Paranoá e Bananal, pode-se observar que o traçado da informação utilizado no âmbito do ZEE do DF manteve-se a mesma que anteriormente levantada pelo mapeamento de 1994 realizado pela SEMATEC/CODEPLAN. A Figura 5.22 mostra o citado limite entre as UH's Riacho Fundo, Lago Paranoá e Bananal, comparando as métricas extraídas do mapa de referência, dos dados utilizados pelo processo de ZEE do DF e os propostos nesse trabalho.



(a)



(b)

Figura 5.22 – Mostra a comparação entre os traçados das UH's Lago Paranoá, Riacho Fundo e Bananal, com base nas três fontes consideradas. **(a)** Com base nas ortofotos levantadas pela Terracap. **(b)** Comparação das citadas UH's, seus limites e as curvas de nível utilizadas na modelagem.

Nesse ponto específico a modelagem indica que o limite altimétrico citado necessita ser ajustado, inclusive no produto atualmente utilizado no processo do ZEE do DF.

Outro ponto importante a ser discutido é a comparação com as Regiões Administrativas do Distrito Federal presente no Plano Diretor de Ordenamento Territorial – PDOT, do ano de 2009 (Brasil, LC 805, de 25 de abril de 2009). Essa Lei Complementar instituiu a revisão do PDOT do DF e sua adequação às diretrizes e políticas ambientais e setoriais implantadas no âmbito do Distrito Federal.

Segundo Santos (2009), a bacia hidrográfica é fortemente e universalmente aceita como unidade territorial em planejamentos ambientais voltados ao manejo dos recursos hídricos, uma vez que é facilmente entendida e delimitada no espaço, compondo em uma caixa preta no qual os fenômenos e interações podem ser interpretados, *a priori*, pelo *input* e *output*. Porém, quando a dimensão do planejamento toma dimensões do urbano e do rural (dinâmica socioeconômica) a

complexidade aumenta, e consequentemente as unidades territoriais básicas para o planejamento e ordenamento territorial transcendem os limites físicos das bacias hidrográficas.

No citado diploma legal ficou instituído, no âmbito do ordenamento territorial, a vinculação da ação política distrital as citadas Regiões Administrativas. A Figura 5.23 mostra a sobreposição entre as UH's, estimadas com base no MDEHC elaborado, e as Regiões Administrativas do DF.

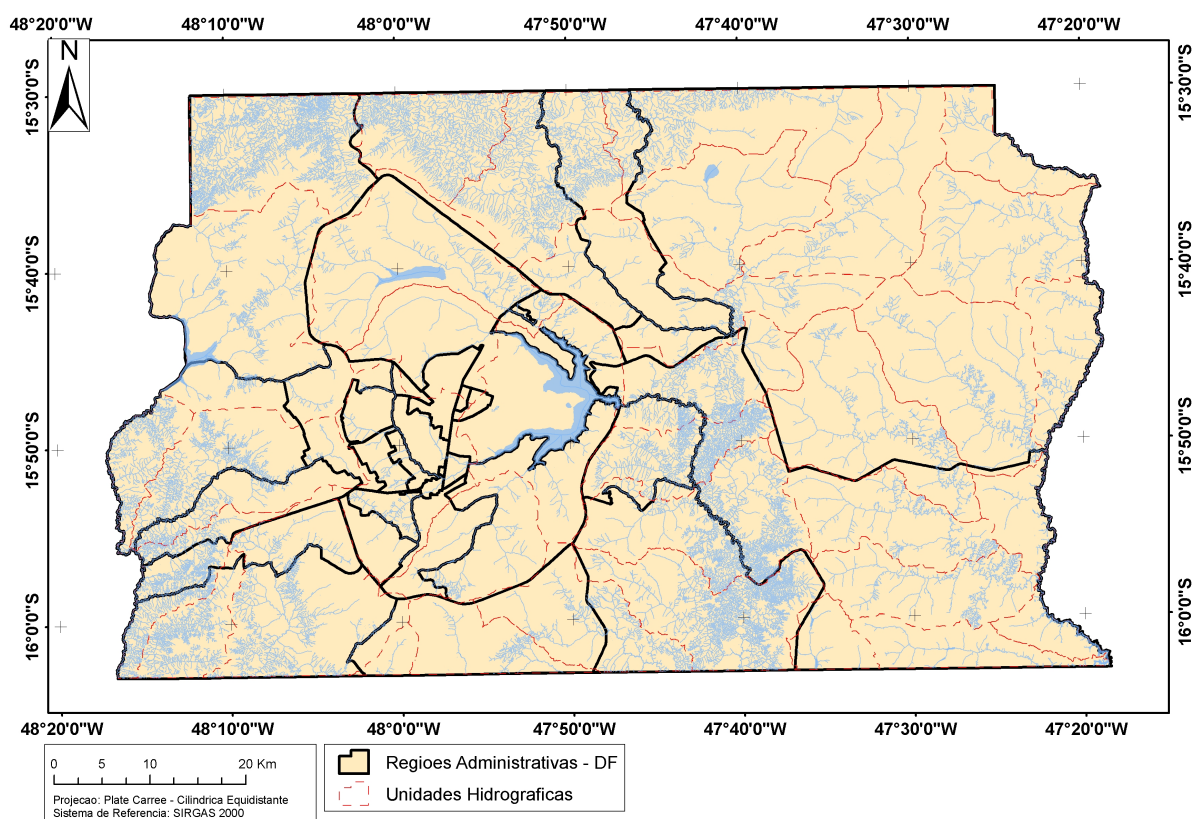


Figura 5.23 – Sobreposição entre UH's e Regiões Administrativas no contexto do Distrito Federal.

Comparando-se essas unidades de gestão, percebe-se que o traçado das Regiões Administrativas não, necessariamente, são compatíveis com a morfometria das UH's. Isso mostra que as unidades territoriais de planejamento da ocupação territorial, instituídas por força de lei, podem considerar informações, além das altimétricas, para sua constituição, tais como dados socioeconômicos e/ou culturais.

De acordo com Fernandes *et al.* (2009), as diferentes dimensionalidades entre unidades territoriais com natureza de coleta distintas podem oferecer dificuldades metodológicas no tocante a integração dos dados e informações levantadas.

Assim, uma dada Região Administrativa pode conter uma ou mais UH's, ou vice-versa. Essas incompatibilidades morfométricas dificultam a implementação da análise sistêmica proposta pela utilização de bacias hidrográficas no âmbito da gestão dos recursos hídricos. A Figura 5.24 mostra, como exemplo, o caso da Unidade Hidrográfica Melchior - Belchior que está contida nas RA's IX - Ceilândia, III – Taguatinga e XII – Samambaia, no seu contexto espacial.

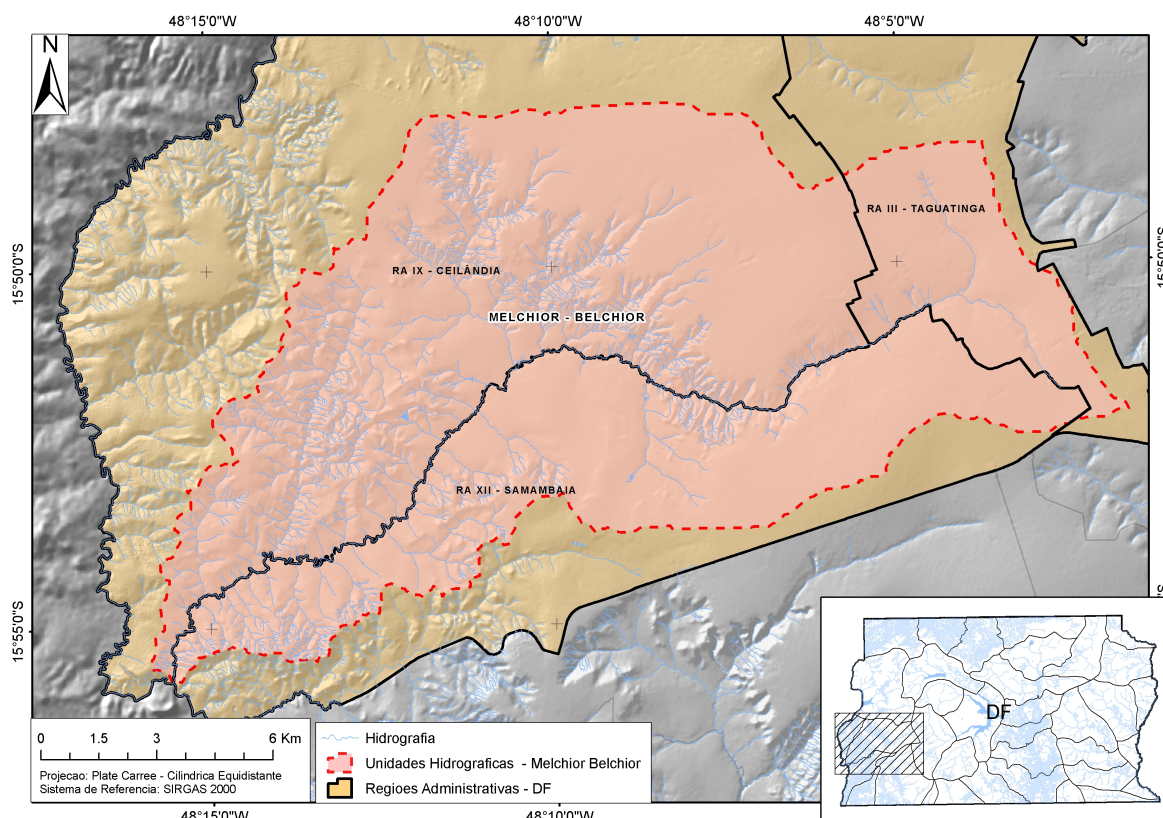


Figura 5.24 – Relação de Regiões Administrativas abrangidas pela Unidade Hidrográfica do Melchior – Belchior.

Nesse caso é nítida a distinção entre os limites da UH e das RA's envolvidas, o que dificulta, por sua vez, a apropriação da gestão dos recursos hídricos, baseada na visão sistêmica e sinérgica, no tocante do planejamento de uso e ocupação do solo. Esse cenário espacial é propício a divergência de diretrizes políticas de base territorial, visto que cada RA pode ter suas prioridades de ação.

Outro exemplo que poderia ser adotado para compatibilizar essas duas unidades territoriais seria a retificação de alguns limites de RA's considerando os divisores das UH's que as compõem. A Figura 5.25 mostra os limites das UH's Pedreira, Sonhim, Santa Maria - Torto e Palma sobrepostas ao limite norte da RA de

Brasília com as RA's Sobradinho II (Colorado) e Brazlândia, referente ao Parque Nacional de Brasília. Observa-se que não há convergência entre os citados traçados.

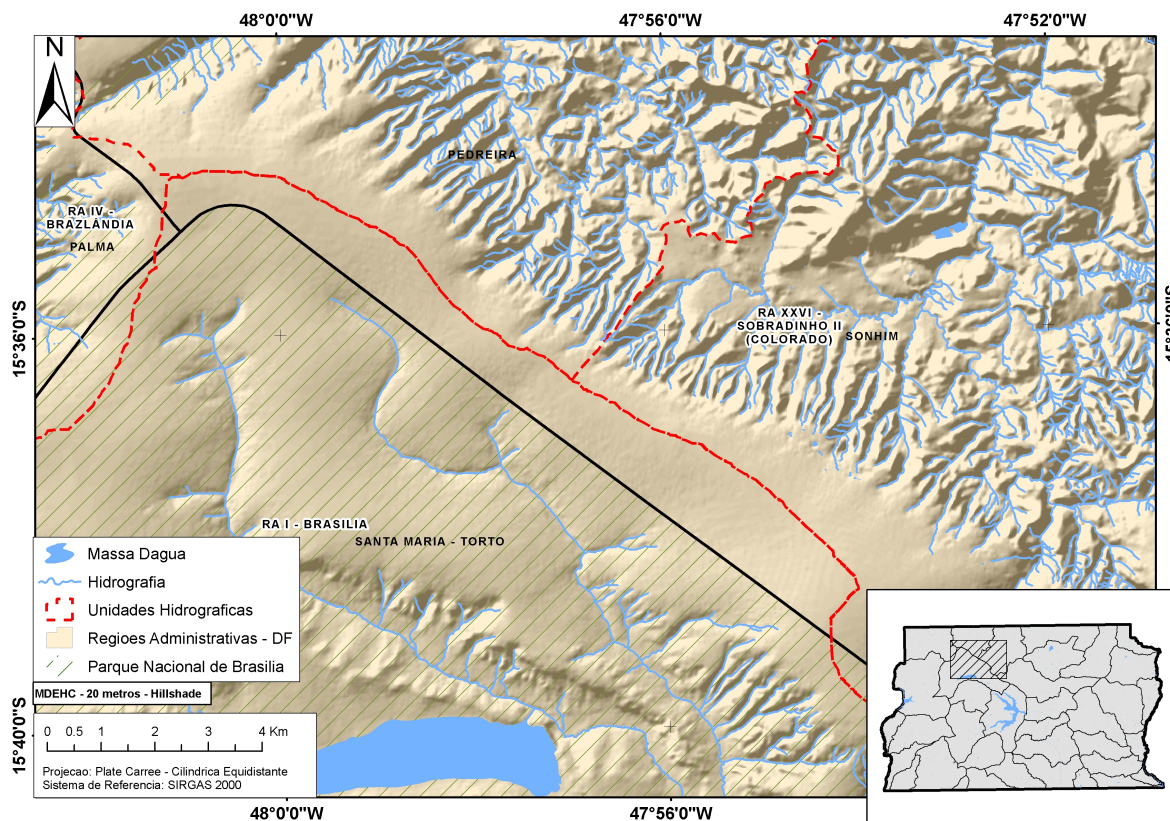


Figura 5.25 – Sobreposição entre as RA's de Brasília, Sobradinho II (Colorado) e Brazlândia e as UH's Santa Maria – Torto, Sonhim, Pedreira e Palma, estimadas do MDEHC elaborado.

Conforme consta no contexto espacial apresentado pela Figura 5.25, as áreas de recargas das nascentes da porção norte do Parque Nacional de Brasília acabam sob jurisdição da RA XXVI – Sobradinho II (Colorado), diferente do restante da área do Parque, que fica na RA I - Brasília. Esse cenário pode dificultar a gestão e a implementação do plano de manejo da citada Unidade de Conservação, situação prejudicial a conservação do meio ambiente.

A incompatibilidade também pode ser constatada no traçado do limite noroeste da RA VI – Planaltina. Nessa situação espacial fica claro que o citado limite não seguiu o comportamento morfométrico do terreno. A Figura 5.26 mostra a sobreposição entre as RA's VI – Planaltina e V – Sobradinho com as UH's derivadas do MDEHC.

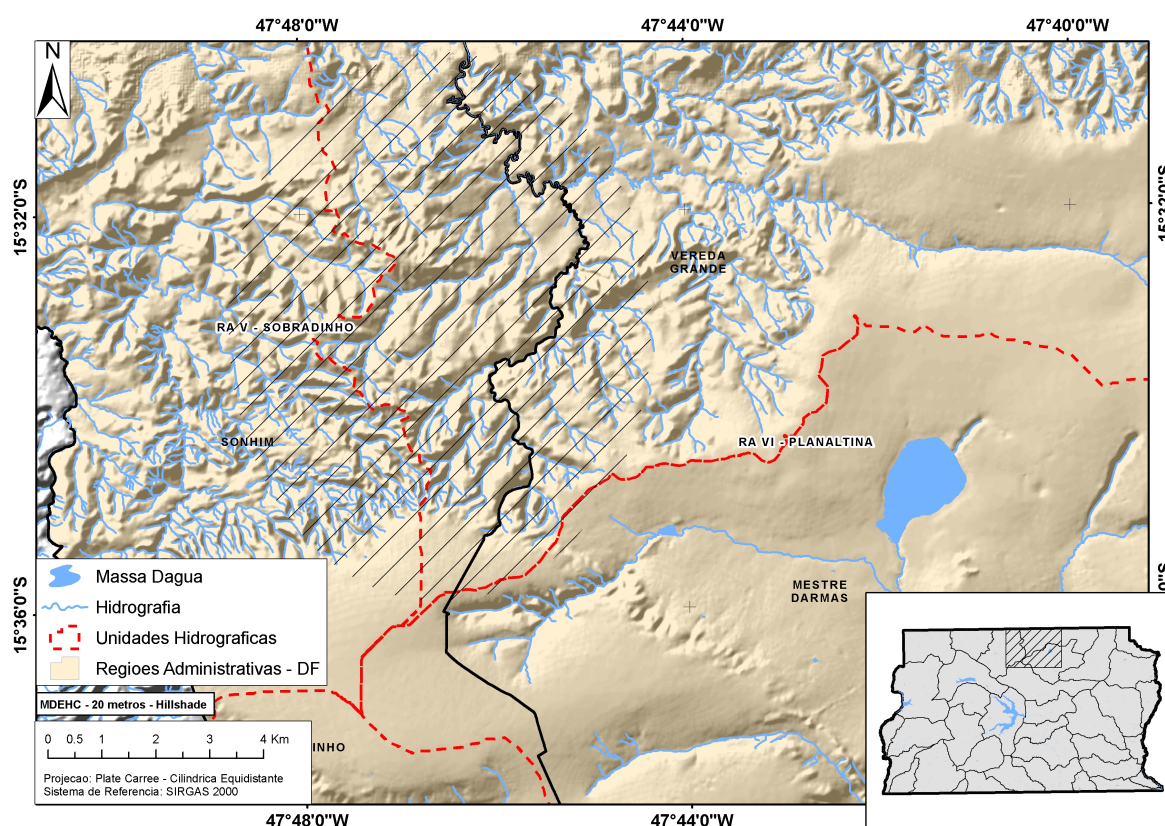


Figura 5.26 – Mostra a incompatibilidade entre o limite noroeste considerado para as RA's VI – Planaltina e V – Sobradinho comparados aos derivados pela metodologia proposta. A área hachurada apresenta o local que deveria ter ajuste no traçado das RA's

No caso específico, observa-se que o limite entre as RA's V - Sobradinho e VI – Planaltina é representado pela vertente de um rio pertencente a UH Vereda Grande, e não ao divisor d'águas oeste da mesma UH. Essa situação pode prejudicar a gestão dos recursos hídricos daquela porção do DF, uma vez que parte dos rios que formam aquela UH estão situados em outra jurisdição administrativa, se considerarmos as políticas de ordenamento territorial. Outros casos de incompatibilidade podem ser apontados dentro da perimetral do DF.

A viabilização da gestão dos recurso hídricos com base nas UH's perde eficácia, uma vez que as diretrizes de ocupação territorial possuem por base unidades territoriais que não necessariamente são delimitadas apenas utilizando dados altimétricos.

Assim, é acentuada a importância dessas como parâmetro de delimitação das Regiões Administrativas, uma vez que essas unidades de gestão não devem apenas contribuir para a temática do manejo territorial dos recursos hídricos, mas também

devem contribuir positivamente para a delimitação das unidades territoriais de planejamento do espaço, que vão além da instância meramente física do terreno.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES

O planejamento e a gestão ambiental dos recursos hídricos no Brasil se apoiam nas bacias hidrográficas visto a natureza sistêmica intrínseca que estas unidades de gestão possuem, cujos limites e formas consideram a diversidade altimétrica do relevo. Com base na utilização de MDE, bem como a sua subsequente consistência hidrológica, é possível definir com maior acurácia e menor subjetividade as bacias hidrográficas de uma dada área, no caso dessa pesquisa, as Unidades Hidrográficas.

O processo de interpolação utilizado sobre os dados vetoriais de entrada (1:10.000) foi satisfatório já que considera a natureza dinâmica da rede de drenagem na estimativa altimétrica contínua da área de interesse. Porém pode-se constatar a presença de depressões espúrias remanescentes na etapa de elaboração do MDE, o que justificou o emprego de consistência hidrológica do mesmo, cujo objetivo foi compatibilizar o comportamento do escoamento superficial do MDE com o registrado na cartografia de referência 1:10.000. O MDEHC alcançado por essas etapas mostrou acurácia altimétrica conforme os valores de EMQ encontrados nas etapas referentes a validação do modelo, que por sua vez justificou a utilização do mesmo como base para a delimitação das unidades gestoras de interesse. Visto o baixo resultados estimados de EMQ (3,32), futuras pesquisas podem elaborar MDE's com resoluções espaciais mais refinadas com o intuito de garantir maior acurácia no traçado de bacias hidrográficas, bem como melhor explorar a potencialidade dos dados altimétricos de entrada, escala 1:10.000, referentes ao novo mapeamento do Distrito Federal.

Dentre os métodos testados de modelagem de fluxo direcional, o que mostrou melhor representação, com relação ao objetivo de delimitação de área de contribuição, para o traçado dos limites das bacias hidrográficas foi o D8, apesar do D_{∞} ser considerado um método mais robusto e específico para outras finalidades. Os resultados indicaram que mesmo com o refinamento do modelo altimétrico de referência, o método D8 continuou apresentando melhores resultados visto sua

capacidade de trabalhar com valores absolutos nas estimativas do modelo de fluxo acumulado. Futuros estudos podem comparar os resultados alcançados nessa pesquisa junto a outros métodos de estimativa de fluxo direcional, tais como os de múltiplas direções desenvolvido por Quinn *et al.* (1991).

A sobreposição entre as 36 UH's delimitadas com base no MDEHC e as mesmas provenientes do mapa de referência de 1994 (SEMATEC/CODEPLAN) mostrou coerência, segundo os indicadores encontrados de valores médios absolutos (5,03 Km²) e relativos (3,71%) referentes as variações de áreas entre os polígonos. Contudo foram observados discrepâncias consideráveis em partes pontuais do DF. Estas discrepâncias nos traçados dos divisores d'água mostra que o atual mapeamento de unidades de gestão para a temática dos recursos hídricos no âmbito do DF necessita de ajustes para o ganho de acurácia na delimitação dos dados a serem utilizados como base no planejamento de uso e conservação dos recursos hídricos.

As Unidades Hidrográficas delimitadas com o apoio de modelagem altimétrica hidrologicamente consistente apresentam a representação dos divisores d'água de maneira mais acurada, uma vez que possuem amparo técnico proveniente da precisão dos dados vetoriais de entrada, bem como da compatível validação altimétrica do modelo interpolado.

Outra potencialidade do método proposto é a automatização no processo de delimitação morfométrica de bacias hidrográficas, que aumentam a rapidez, diminuem a subjetividade do usuário e aumentam as possibilidades de reprodução se comparadas às técnicas manuais (OLIVEIRA, 2008).

As limitações encontradas foram, basicamente, referentes a disponibilização dos dados vetoriais utilizados como insumos nos processamentos metodológicos, visto que os mesmos só constavam do limite físico do Distrito Federal. Futuras pesquisas podem verificar a aplicabilidade da metodologia proposta para MDEHC com resoluções espaciais mais finas e de menor extensão geográfica, inclusive utilizando fontes diferenciadas de dados de entrada.

Por fim, a sobreposição entre as 36 UH's delimitadas e as Regiões Administrativas do DF mostraram a incompatibilidade morfométrica entre essas unidades de gestão territorial, o que podem, na prática, distanciar as diretrizes da

gestão dos recursos hídricos com relação as ações de planejamento e ocupação territorial.

Pode-se perceber que o ajuste de algumas RA's com relação ao traçado das UH's poderia trazer benefícios no que tange o planejamento territorial, em especial atenção a gestão e implementação do Plano de Manejo do Parque Nacional de Brasília, que segundo o atual polígono dessa unidade de conservação não segue o comportamento morfométrico do terreno. Outro ponto específico levantado é com relação ao caso tratado sobre o limite noroeste da RA VI – Planaltina, onde poder-se-ia proceder os devidos ajustes de limites.

Futuras pesquisas podem propor a integração metodológica de delimitação das RA's tomando por base as UH's, e assim aproximar a gestão e uso racional dos recursos hídricos com relação as políticas de ocupação territorial. Esse seria um importante passo no planejamento ambiental de ocupação do espaço considerando a capacidade de suporte do ambiente em questão, bem como a implementação dos méritos da Lei das Águas, uma vez que essa lógica metodológica adotada para a fragmentação das bacias hidrográficas do território do DF em Unidades Hidrográficas, inicialmente proposto pelo mapeamento de 1994, está atualmente sendo reutilizada no processo de Zoneamento Ecológico-Econômico, ora em curso, que irá pautar a revisão posterior do Plano Diretor de Ordenamento Territorial desse ente federado.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AB'SABER, A. N. As altas superfícies de aplainamento do Brasil sudeste. **Rev. Fac. Campineiras**, v. 01 (4), 1964. 60 – 67p.

ACKERMANN, F. Techiques and Strategies for DEM Generation. In: **Digital Photogrammetry An Addendum to the Manual of Photogrammetry**. ASPRS – American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Ed. Cliff Greve, 1996, 135 – 149p.

BARBOSA, F. L. R. **Desenvolvimento de metodológica para delimitação de ottobacias a partir de modelo digital de elevação hidrologicamente consistente na bacia hidrográfica do rio Verde Grande**. (Monografia de final de curso), Curso de bacharelado em Geografia, Universidade de Brasília, Instituto de Ciências Humanas, Departamento de Geografia. 2007, 54p.

BARROS, R. S. **Avaliação da altimetria do Modelo Digital de Elevação obtidos a partir de sensores orbitais**. Tese de Doutorado em Geografia. Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Instituto de Geociências. 2006, 172p.

BOLAND, J and 16 co-authors. Chapter 8: Cameras and Sensing Systems. In: MCGLONE, J. C (Org.). **Manual of Photogrammetry**. 5 ed. Bethesda: ASP&RS, 2004. 629 – 636.

BRASIL. Decreto 89.817, de 20 de junho de 1984. **Estabelece as instruções reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional**.

BRASIL. Decreto-Lei 24.643, de 10 de julho de 1934. **Dispõe sobre o Código das Águas**.

BRASIL. Lei Federal 6.938, de 31 de agosto de 1931. **Dispõe sobre a Política Nacional de Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e da outras providencias**.

BRASIL. Lei Federal 9.433, de 8 de janeiro de 1997. **Dispõe sobre a Política Nacional de Recursos Hídricos**.

BRASIL. Câmara Legislativa do Distrito Federal. Lei Complementar 803, de 25 de abril de 2009. **Aprova a revisão do Plano Diretor de Ordenamento Territorial do Distrito Federal – PDOT e dá outras providências**.

BRASIL. Governo do Distrito Federal – GDF. Decreto-distrital nº 4008, de 26 de dezembro de 1977. **Institui o sistema cartográfico do Distrito Federal**.

BRASIL. Governo do Distrito Federal – GDF. Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos – SEMARH. **Zoneamento Ecológico-Econômico do Distrito Federal – ZEE/DF**. Brasília, 2012. Disponível em < <http://www.zee-df.com.br/produtos.html>>. Acessado em 28 de junho de 2012.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente – MMA. Agência Nacional de Águas – ANA. **Caderno de recursos hídricos: Disponibilidade e demanda de recursos hídricos no Brasil**. CONEJO, João Gilberto Lotufo [coord.]. [s.n.], Brasília, 2005, 123p.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente – MMA. Agência Nacional de Águas – ANA. **Topologia Hídrica: Método de construção e modelagem da base hidrográfica para suporte a gestão de recursos hídricos v.1.11**. BRAGA, Benedito [coord.]. [s.n.], Brasília, 2006, 29p.

BRASIL. Resolução CONAMA 357, de 17 de março de 2005. **Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e da outras providências**.

BURROUGH, P. A. The tecnologic paradox in soil survey: new methods and techniques of data capture and handling. In: **Soil Survey: Perspectives and Strategies for the 21th century**, ITC publication, 1992. 4 – 20p.

CAMARA, G.; CASANOVA, M. A.; HEMERLY, A. S.; MAGALHAES, G. C.; MEDEIROS, C. M. B. **Anatomia de Sistemas de Informação Geográfica**. Campinas: Instituto de Computação, UNICAMP, 1996. 197p.

CARVALHO, J. C.; SALES, M. M.; SOUZA, N. M.; MELO, M. T. S. **Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro**. Brasília: Universidade de Brasília, FINATEC, 2006.

CCRS. **Canada Centre for Remote Sensing**. 2004

CHAVES, M. A. **Modelos digitais de elevação hidrologicamente consistentes para a Bacia Amazônica**. Tese de doutorado em Ciência Florestal, Viçosa, Universidade Federal de Viçosa – UFV, 2002. 115p.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. 1999. 1 – 33p.

COSTA-CABRAL, M. ; BURGESS, S. J. Digital elevation model networks (DEMON): A modelo of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas. **Water Resource Res.**, v. 30 (6), 1994. 1681 – 1692p.

CRESSIE, N. A. C. **Statistics for spatial data**. Nova Iorque: John Wiley and sons, 1993. 900p.

DAMACENA, F. A.; GUIMARAES, R. F.; CATAO, R. C.; GOMES, R. A. T.; BARBOSA, F. L. R.; CARVALHO JUNIOR, O. A.; MARTINS, E. S. Identificação de zonas de saturação a partir de dados de transmissividade obtidos em campo na bacia hidrográfica do Rio Jardim (DF). **Espaço & Geografia**, v. 12, n. 1, 2010. 105 – 123p. (ISSN 1516 – 9375)

DAVID, M. **Geostatistical ore reserve estimation**. Nova Iorque: Elsevier Scientific, 1997. 364p.

DJOKIC, D. **Comprehensive Terrain Preprocessing Using ArcHydro Tools**. Redlands: ESRI, 2008.

DRUCK, S. A Geoestatística e os Sistemas de Informações Geográficas. **Espaço & Geografia**, Brasília, v. 5, n. 1, 2002. 1 – 15p (ISSN 1516 – 9375)

ESRI – Environmental Systems Research Institute, Inc. **ArcInfo version 7.0.4 On-line documentation**. Redlands, Ca, 1996.

FELGUEIRAS, C. M. B. **Geoprocessamento para projetos ambientais**. 2 ed, São Jose dos Campos, SP: INPE, 1998.

FERNANDES, M. C. Discussões conceituais e metodológicas do uso de geoprocessamento em análises geoecológicas. In: **Questões metodológicas e novas temáticas na pesquisa geográfica**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Publit, 2009. p. 280 – 299.

FLORENZANO, T. G. **Imagens de Satélite para estudos ambientais**. Oficina de textos, São Paulo, 2002.

FREITAS, L. F. **Desenvolvimento de metodologia de identificação de áreas com alta probabilidade de ocorrência de voçorocas em ambientes urbanos**. (Monografia de final de curso), Curso de bacharelado em Geografia, Universidade de Brasília, Instituto de Ciências Humanas, Departamento de Geografia. 2005, 38p.

GALVÃO, W.S. **Uso de sistemas de informação geográfica (SIG) na geração de modelos de favorabilidade a locação de estações fluviométricas e de unidades geoambientais homogêneas na bacia do rio São Francisco**. Tese de doutorado em geologia. Brasília, Universidade de Brasília, Instituto de Geociências – IG. 2004, 303p.

GONÇALVES, T. D. **Geoprocessamento como ferramenta de apoio a gestão dos recursos hídricos subterrâneos do Distrito Federal**. (Dissertação de Mestrado), Mestrado em Geologia, Universidade de Brasília – UnB, Instituto de Geociências, 2007. 88p.

GUERRA, A. T.; GUERRA, A. J. T. **Novo Dicionário Geológico-Geomorfológico**. 3.ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003. 652p.

GUIMARÃES, R. F.; FERNANDES, N. F.; GOMES, R. A. T; CARVALHO JUNIOR, O. A. Fundamentação teórica do modelo matemático para previsão de escorregamentos rasos *Shallow Stability*. **Revista Espaço & Geografia**, Brasília, v. 06, n. 2, 2003. 133 – 150p. (ISSN 1516 – 9375)

HEIPKE, C.; KOCH, A.; LOHNANN, P. Analysis of SRTM DTM – Methodology and Practical Results. In: ISPRS Commission – IV Symposium, Ottawa, 2002.

HELLWEGER, F. **AGREE – DEM Surface Reconditioning System**. University of Texas, Austin, 1997.

HODGSON, M. E.; JENSEN, J. R.; SCHMIDT, L.; SCHILL, S.; DAVIS, B. A. An Evaluation of LIDAR- and IFSAR- Derived Digital Elevation Models in leaf-on Conditions with USGS Level 1 and Level 2 DEMS. **Remote Sensing of Environment**. V. 84, 2003. 295 – 308p.

HUTCHINSON, M. F. A locally adaptive approach to the interpolation of digital elevation models. In: INTERNATIONAL CONFERENCE, 3, Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling. Santa Fe, NM, 1996.

HUTCHINSON, M. F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. **Journal of Hydrology**, v. 106, Amsterdam, 1989. 211 – 232p.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. Tradução Jose Carlos Neves Epiphanyo (coord.)...[et al.]. São Jose dos Campos, SP: Parênteses, 2009. (ISBN 978 – 85 – 60507 – 06 – 1)

KRIGE, D. G. A statistical approaches to some basic mine evaluation problems on the Witwatersrand. In: **Johanesburg Chemistry Metallurgy Mining Society South African**, v. 52, 1951. 119 – 139p.

LANNA, A. E. L. **Gerenciamento de Bacia Hidrográfica – Aspectos conceituais e metodológicos**. Brasília, DF. 170p

LEA, N. L. An aspect driven kinematic routing algorithm. In: ANDERSON, A. J.; ABRAHAM, A. D. **Overland Flow: Hydraulics and Erosion Mechanics**, Nova Iorque: Chapman & Hall, 1992.

LLAMAS, J. **Hidrologia geral: princípios y aplicaciones**. Bilbao: Servicio Editorial de la Universidad del Pais Vasco, 1993. 627p.

MA, R. Generation and Building Detection from Lidar data. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 71 (7), 2005. 847 – 854p.

MADSEN, S. N.; ZEBKER, H. A. Imaging Radar Interferometry. In: HENDERSON and LEWIS (org.). **Principles and Applications of Imaging Radar**. Nova Yorque: John Wiley, 1998, 359 – 380p.

MARTINS, E. S.; BAPTISTA, G. M. M. Compartimentação Geomorfológica e sistemas morfodinâmicos do Distrito Federal. In: **Inventario Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal**. Brasília: IEMA/SEMATEC/UNB, 1998. 53p.

MARTZ, L. W.; GARBRECHT, J. Digital elevation model issues in water resources modeling. **Hydrologic and hydraulic modeling support with geographic information systems**. ESRI Press, 2000.

MAUNE, D. F. **Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual**. Bethesda: ASP&RS, 2001. 540p

MENDES, C. A. B. Integração de modelos hidrológicos e sistemas de informações geográficas: fundamentos. **Revista Brasileira de Engenharia – caderno de recursos hídricos**, v. 1, n. 14, 1996.

MICELI, B. S.; DIAS, F. M.; SEABRA, F. M; SANTOS, P. R. A; FERNANDES, M. C. Comparação da validação vertical de modelos digitais de elevação para médias e pequenas escalas em diferentes configurações topográficas. In: III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologia da Geoinformação. **Anais...** Recife, 2010. p. 01 – 07.

MILARÉ, E. **Direito do Ambiente. A Gestão Ambiental em foco: Doutrina, Jurisprudência, Glossário**. 7 ed. rev., atual. e reform. São Paulo: Editora Revista dos Tribunais, 2011. 1647p. (ISBN 978 – 85 – 203 – 3918 – 3)

MILLER, S. B. Photogrammetric Products. In: MCGLONE, J. (Org.). **Manual of Photogrammetry**. 5 ed. Bethesda: ASP&RS, 2004. 983 – 1013p.

NASA SRTM. **Shuttle Radar Topography Mission**. Pasadena: Jet Propulsion Lab, 2006.

NOVAES PINTO, M. Caracterização Geomorfológica do Distrito Federal. In: NOVAES PINTO, M. (Org.). **Cerrado: Caracterização, Ocupação e Perspectivas**. 2 ed. Brasília: Editora UnB, 1994. 285 – 320p.

NOVO, E. L. M. **Sensoriamento Remoto. Princípios e Aplicações**. 3 ed, São Paulo: Editora Blucher, 2008.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações**. 2 ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1992. 269p.

O'CALLAGHAN, J. F.; MARK, D. M. The extraction of drainage networks from digital elevation data. **Computer vision, graphics and image processing**, v. 28, n. 3, San Diego, CA, 1984. 323 – 344p.

O'LOUGHLIN, E. M. Prediction of Surface Saturation Zones in Natural Catchments by Topographic Analysis. **Water Resources Research**, v. 22, n. 5, 1986. 794 – 804p.

OLIVEIRA, S. N. **Metodologia para delimitação e análise multivariada de atributos morfométricos da bacia de drenagem usando modelo digital de elevação hidrologicamente corrigido**. (Dissertação de Mestrado), Curso de Pós-graduação em Geografia, Universidade de Brasília, 2008. 74f.

PIGEON, L; SOLAIMAN, B; TOUTIN, T.; THOMSON, K. P. B. 3D Map Feature Extraction from Radar and Visible Remotely Sensed Image Fusion. In: XIII International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications, 2000.

PINTO, N. L. S.; HOLTZ, A. C. T.; MARTINS, A. J. **Hidrologia se superfície**. 2 ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1973. 179p.

PINTO, S. **Um Sistema de Representação de Relevos**. (Dissertação de mestrado) DCC/ICEX/UFMG, Belo Horizonte, 1994. 64p.

QUINN, P.; BEVEN, K.; CHEVALLIER, P.; PLANCHON, O. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models. **Hydrological processes**, v. 5, 1991. 59 – 79p.

RABUS, B.; EINEDER, M.; ROTH, A.; BAMLER, R. The Shuttle Radar Topography Mission – A new Class of Digital Elevation Models acquired by Spaceborne Radar. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**. v. 57, 2003. 42 – 43p.

REATTO, A.; MARTINS, E. S.; FARIAS, M. F. R.; SILVA, A. V.; CARVALHO JUNIOR, O. A. **Mapa Pedológico Digital SIG Atualizado do Distrito Federal Escala 1:100.000 e uma Síntese do Texto Explicativo**. Brasília: EMBRAPA Cerrados, 2004.

REES, W. G. **Physical Principles of Remote Sensing**. 2 ed, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2001.

RIBEIRO, C. A. A. S. **Sistema de informações geográficas aplicados a recursos hídricos**. Apostila de curso, Viçosa, 2000.

RUBERT, O. A. V.; RIBEIRO, C. A. A. S.; CHAVES, M. D. Um novo divisor de águas na geração de modelos digitais de elevação hidrológicamente consistentes. In: XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Belo Horizonte, MG, 1999. 14p.

SAKUDE, M. T. S. Modelagem de terrenos por superfícies triangulares de bezier. **Anais...SIBGRAPI V**, 1992. 213 – 222p.

SANDEN, J. J.; VACHON, P. W.; GOWER, J. F. L. Combining Optical and Radar Satellite Image Data for Surveillance of Coastal Water. In: Sixth International Conference of Remote Sensing for marine and coastal environments, 2000.

SANTOS, C. J. B.; SILVA, J. F. C.; MELLO, M. P. Avaliação da qualidade de Modelos Digitais de Terreno construídos a partir de diferentes fontes de aquisição de dados. In: Congresso de Cartografia. **Anais...** Porto Alegre. Seção Pôster, Fotogrametria. [CD ROM], 2001.

SANTOS, R. F. **Planejamento Ambiental: teoria e prática**. 2 ed. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2004. (ISBN 978 – 85 – 86238 – 62 -8)

SILVA, F. Q. A Gestão dos recursos hídricos após a Lei 9.433, de 08.01.1997. In: FREITAS, V. P. (Org.). **Direito Ambiental em evolução**. Curitiba: Juruá, 1998, p. 83.

SILVEIRA, A. L. L. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. In: TUCCI, C. E. M (Org.). **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 2 ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, ABRH, 2001. 35 – 51p.

TARBOTON, D. G. A new method for the determination of flow directions and upslope áreas in the grid digital elevation models. **Water Resources Research**, v. 33, n. 2, 1997. 309 – 319p.

TOMMASELLI, A. M. G; SANTOS, D. R. Uma estratégia para extracao semi-automatica de feições com analise do M.N.E. In: **Congresso Brasileiro de Cadastro técnico Multifinalitario**, Florianopolis, 2000.

TOUTIN, T.; GRAY, L. **State-of-art of Elevation Extration from Satellite SAR Data**. 2000.

VALERIANO, M. M. **Modelo Digital de Elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul**. São Jose dos Campos, SP: INPE – Coordenação de Ensino, Documentação e Programas Especiais (INPE – 10550 – RPQ/ 756), 2004. 72p.

VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F. **Topodata: Seleção de Coeficientes Geoestatísticos para o refinamento unificado de dados SRTM**. São Jose dos Campos, SP: INPE, 2010.

VALERIANO, M. M.; PICINI, A, G.; MELLO, M. H. A. Estratificação dos efeitos anisotrópicos do relevo na geração de mapas pluviométricos por geoprocessamento. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, RS, v. 10, n. 1, 2002. 167 - 177p.

VALERIANO, M. M.; PRADO, H. Técnicas de geoprocessamento e de amostragem para o mapeamento de atributos anisotrópicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 25, n. 3, 2001. 997 – 100p.

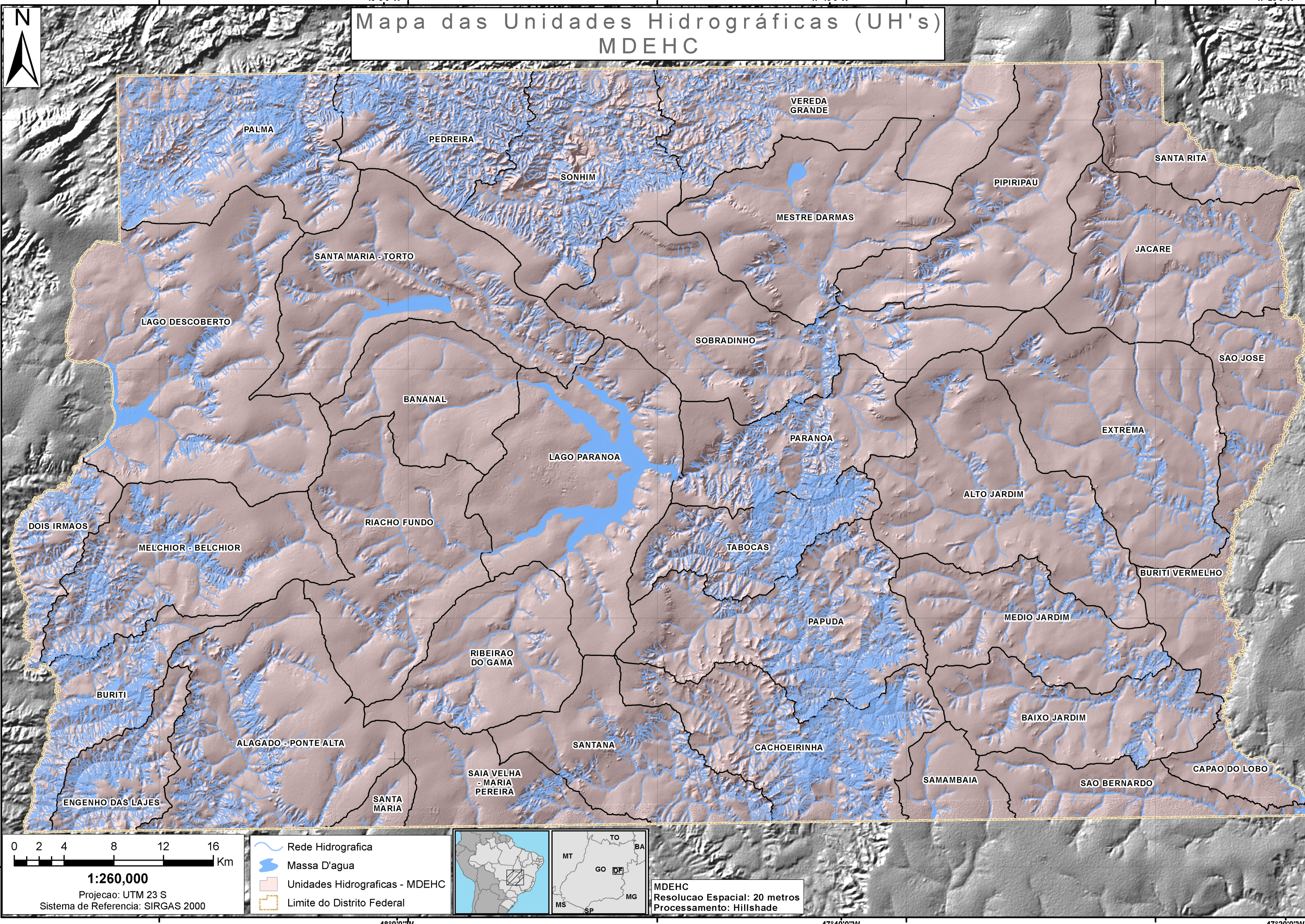
VALERIANO, M. M.; SANTOS, A. O. Mapping of plant-soil data with high random variability. **Acta Scientiarium (UEM)**, Maringá, PR, v. 24, n. 5, 2002. 921 – 928p.

WALLIS, C.; WATSON, D.; TARBOTON, D.; WALLACE, R. Parallel Flow-Direction and Contributing Area Calculation for Hydrology Analysis in Digital Elevation Models. In: **PDPTA'09 – The 2009 International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications**, Las Vegas, Nevada, USA, 2009. 13 – 16p.

WOLF, P. R.; DEWITT, B. A. **Elements of Photogrammetry with Applications in Geographic Information Systems**. Nova Iorque: McGraw Hill, 2000. 608p.

ANEXOS

Mapa das Unidades Hidrográficas (UH's) MDEHC

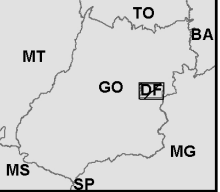


0 2 4 8 12 16 Km

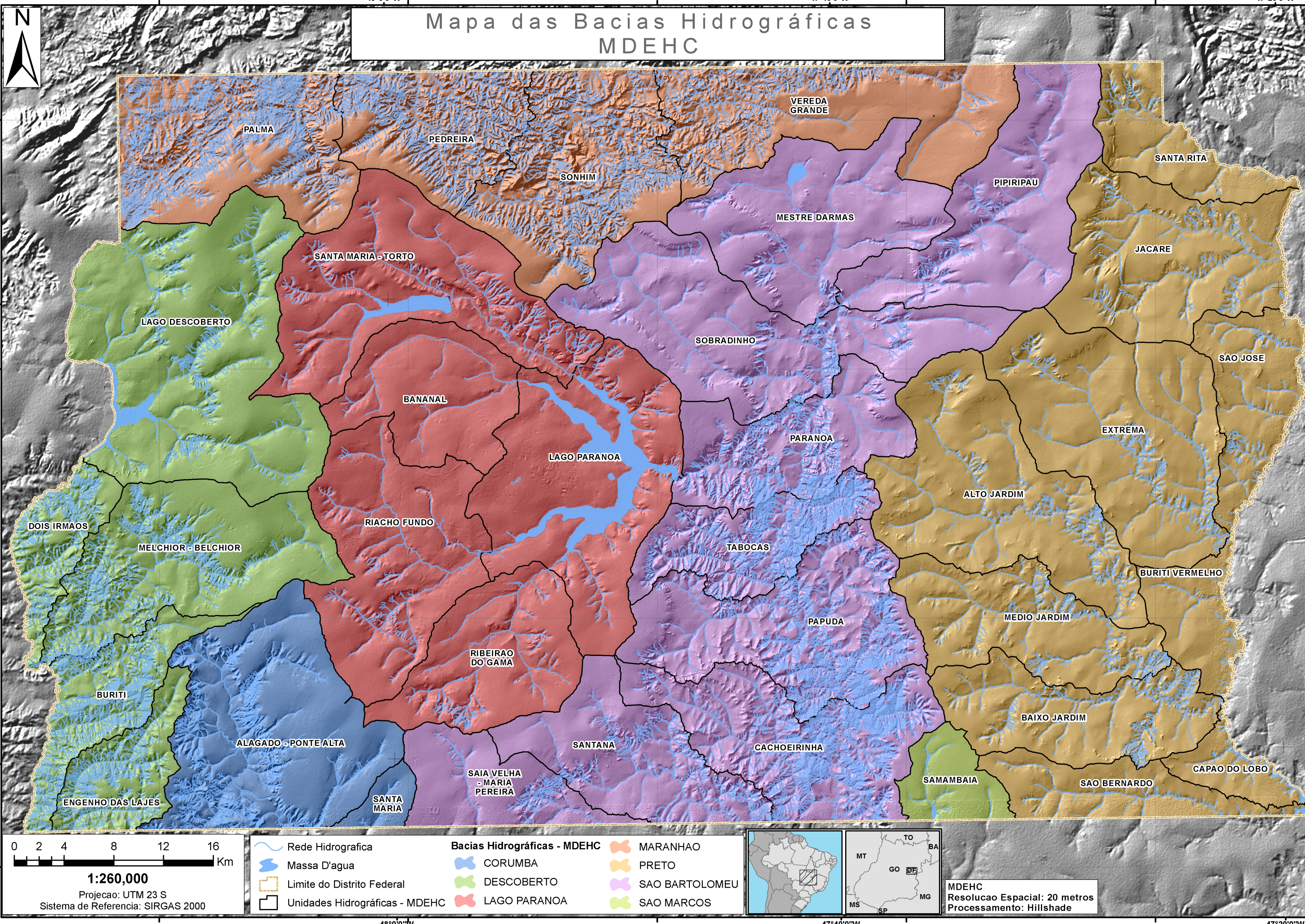
1:260,000

Projecao: UTM 23 S
Sistema de Referencia: SIRGAS 2000

- Rede Hidrografica
- Massa D'agua
- Unidades Hidrograficas - MDEHC
- Limite do Distrito Federal



MDEHC
Resolucao Espacial: 20 metros
Processamento: Hillshade



Mapa das Bacias Hidrográficas MDEHC

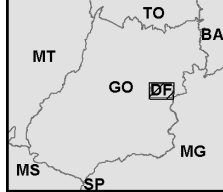


0 2 4 8 12 16 Km

1:260,000

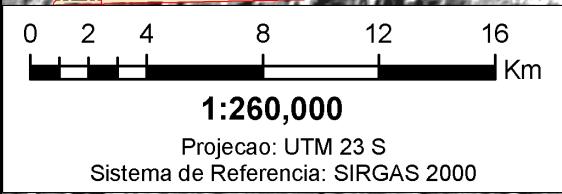
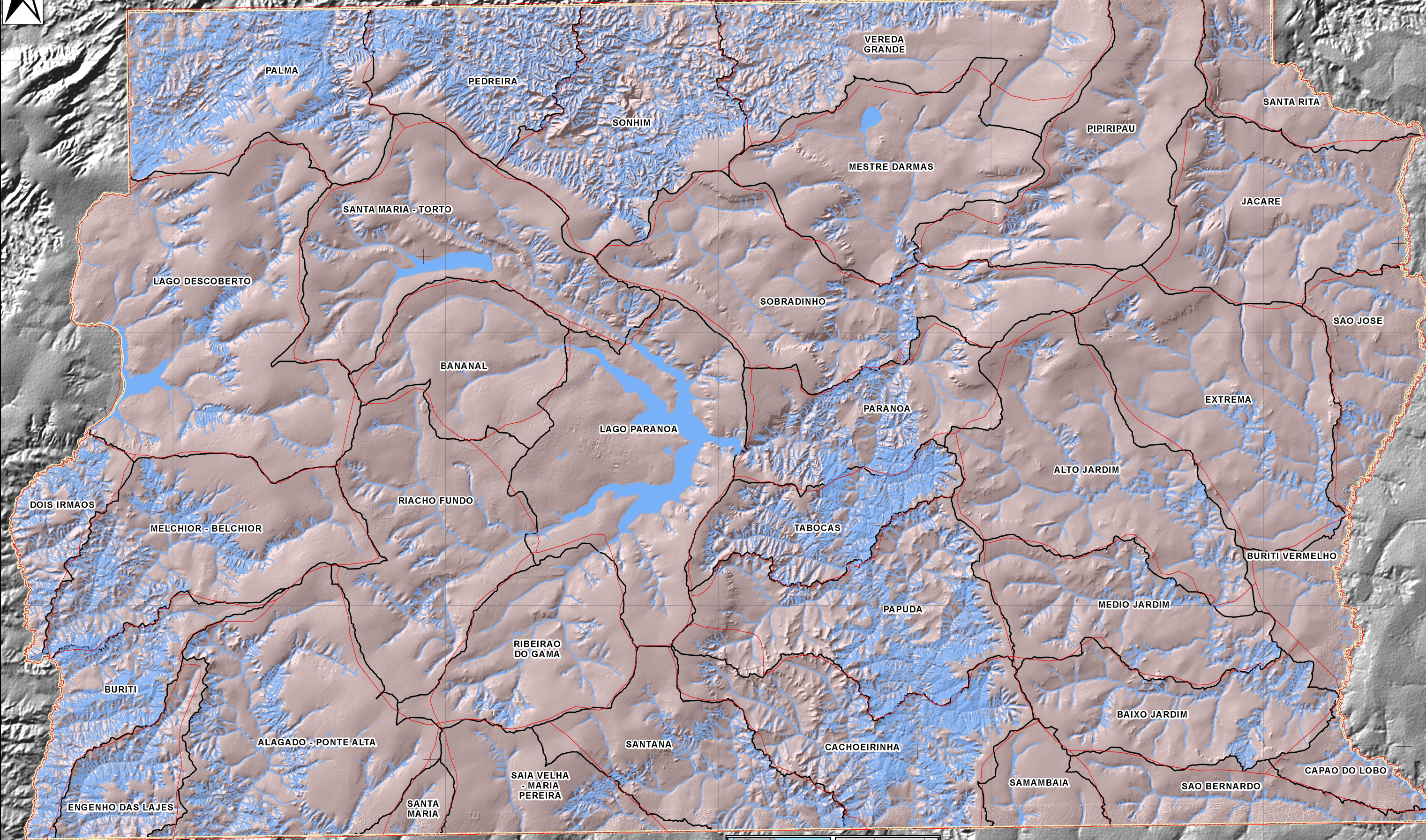
Projecao: UTM 23 S
Sistema de Referencia: SIRGAS 2000

Rede Hidrografica	Bacias Hidrográficas - MDEHC	MARANHAO
Massa D'agua	CORUMBA	PRETO
Limite do Distrito Federal	DESCOBERTO	SAO BARTOLOMEU
Unidades Hidrográficas - MDEHC	LAGO PARANOA	SAO MARCOS

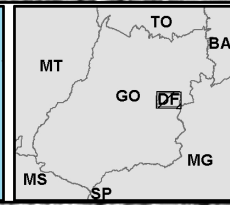


MDEHC
Resolucao Espacial: 20 metros
Processamento: Hillshade

Mapa Comparativo - Unidades Hidrográficas (UH's) - MDEHC X Sematec_Codeplan

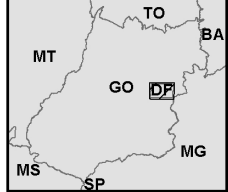
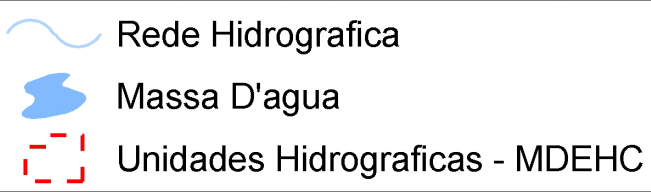
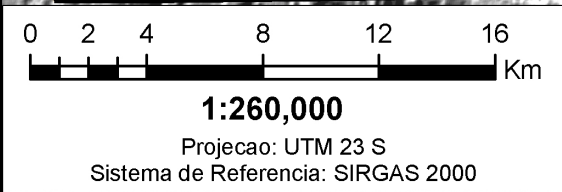
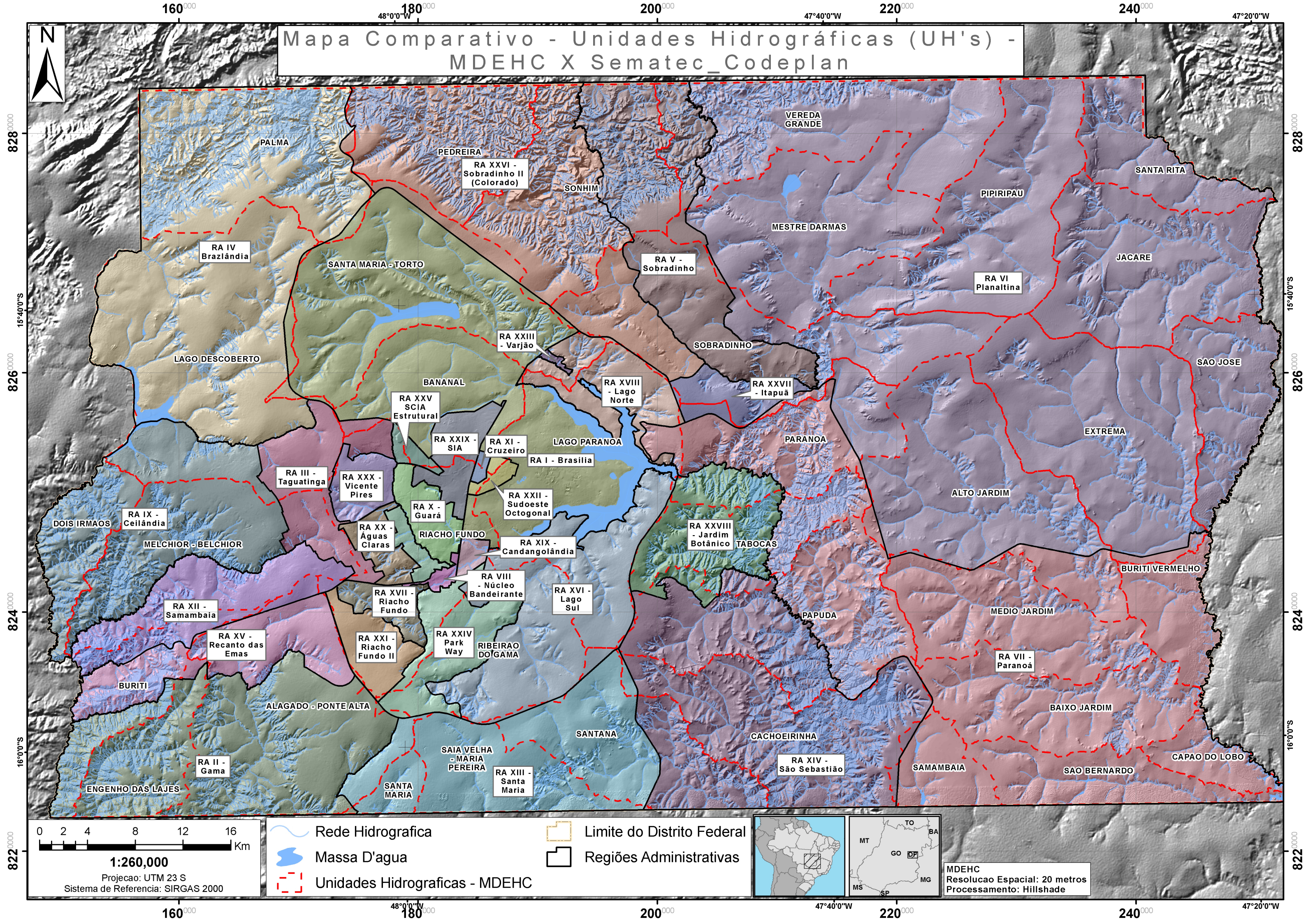


- Rede Hidrografica
- Massa D'agua
- Unidades Hidrograficas - MDEHC
- Unidades Hidrograficas - Sematec_Codeplan
- Limite do Distrito Federal



MDEHC
Resolucao Espacial: 20 metros
Processamento: Hillshade

Mapa Comparativo - Unidades Hidrográficas (UH's) - MDEHC X Sematec_Codeplan



MDEHC
Resolucao Espacial: 20 metros
Processamento: Hillshade